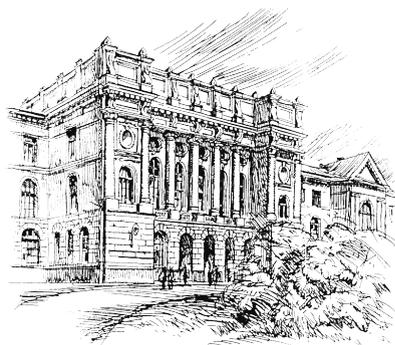


4(103)/2010



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА.
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.
УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Алферов Ж.И., академик РАН; *Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);
Костюк В.В., академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., чл.-кор. РАН; *Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН;
Патон Б.Е., академик РАН и НАН Украины; *Федоров М.П.*, чл.-кор. РАН;
Фортов В.Е., академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;
Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;
Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Болдырев Ю.Я., д-р техн. наук, профессор;
Давыденко М.О., технический секретарь;
Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шабров Н.Н., д-р техн. наук, профессор.

Журнал выходит под научно-методическим руководством Российской академии наук с 1995 года.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал издается в пяти сериях:
Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

Подписной индекс **18390** в каталоге “Газеты. Журналы” Агентства “Роспечать”.

Журнал включен в базу данных “Российский индекс научного цитирования” (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibraru.ru>.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции серии (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010



Содержание

Проблемы передачи и обработки информации

Козлов А.В., Лоханова А.И., Симончик К.К. Алгоритм детектирования музыкальных фрагментов в задачах речевой обработки.....	7
Крючковский В.В., Петров Э.Г., Брынза Н.А. Информационная предпочтительность статистической формы представления исходных данных в условиях интервальной неопределенности.....	11
Симончик К.К., Галинина О.С., Капустин А.И. Алгоритм обнаружения речевой активности на основе статистик основного тона в задаче распознавания диктора.....	18
Гололобов Л.И. Модели совместимости математических методов исследования подсистем «человек» и «техника».....	23
Кулешов И.А., Малахов Ю.А., Дуплинский М.А. К вопросу о формировании канала утечки нарушителя.....	33

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Манжула В.Г. Особенности проектирования дифференциальных усилителей с повышенным коэффициентом усиления при низкоомной нагрузке.....	39
Недопёкин А.Е., Колчев А.А., Шумаев В.В. Погрешности измерения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала.....	42
Колчев А.А., Шпак Д.Г. Квазиоптимальная обработка широкополосного сигнала с ЛЧМ.....	48
Ростов Н.В. Синтез и компьютерная оптимизация цифровых последовательных регуляторов высокого порядка.....	53
Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Манжула В.Г. Метод повышения коэффициента усиления SiGe-операционных усилителей с низковольтным питанием.....	58
Рогов С.А., Розов С.В., Скороход В.В. Увеличение динамического диапазона акустооптического анализатора спектра с помощью автоматической регулировки усиления.....	62

Системный анализ и управление

Голландцев Ю.А., Дубенецкий В.А. Информационно-управляющая система поиска партнеров и проектов с использованием инструментальных средств систем класса ERP.....	67
Брехов А.Г., Грищенко А.А. Аспекты понятийного аппарата теории систем управления логистикой.....	75

Вычислительные машины и программное обеспечение

Ковалев М.С., Далингер Я.М., Мяготин А.В. Формальная верификация программной реализации алгоритма пирамидальной сортировки на языке СИ-0.....	83
Бутенко И.В., Устинов С.М. Методика построения репозитория метаданных для существующей информационной системы.....	92

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Болдырев Ю.Я. Суперкомпьютерные технологии как современное воплощение междисциплинарного подхода в научно-образовательной деятельности.....	99
Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В., Шанина А.С. Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве... ..	106
Ненашев А.В., Перистая А.С. Метод анализа и моделирования нелинейных устройств с применением теоремы компенсации.....	112
Жарковский А.А., Куриков Н.Н., Пугачев П.В., Шабров Н.Н. Компьютерное исследование и визуализация течения в центробежных насосах.....	119
Нагорный В.С., Пщелко Н.С. Основы расчета сопротивления наноструктурированных пленок при электрокаплеструйном формировании.....	123

Козлов А.Н. Математическая модель для расчета диаграммы направленности штыря открытого штепсельного разъема.....	130
Басыров А.Г. Концептуальная модель энергосберегающих вычислительных процессов в специализированных вычислительных системах.....	135
Утакаева И.Х., Кочкаров А.А. К вопросу об алгоритмах распознавания предфрактального графа ...	139
Рутковский А.Л., Болотаева И.И., Юрошева Т.А. Алгоритм модифицированного симплексного поиска в задаче оптимального управления параметрами процесса электролиза цинка.....	142

Приборы, информационно-измерительные системы

Курочкин Л.М. Распределенная информационная система технологической подготовки производства.....	147
---	-----

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Масюк А.А., Сараджишвили С.Э. Контентная фильтрация и управление доступом к ресурсам сети Интернет в образовательных учреждениях.....	153
--	-----

Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»

Ефимов М.Ю. Разработка и реализация основ компилятора С# с помощью Microsoft Phoenix.....	164
Воинов Н.В., Котляров В.П. Применение метода эвристик для создания оптимального набора тестовых сценариев.....	169
Муханов Р.С., Сафонов В.О. Реализация и практическое применение системы ASPECT.NET для академической версии .NET.....	174
Веселов А.О., Котляров В.П. Автоматизация тестирования проектов в области телекоммуникаций.....	180
Дробинцев П.Д., Даишев М.Ш., Котляров В.П. Интегрированная среда автоматизации тестирования на основе технологии Eclipse.....	186
Никифоров И.В., Петров А.В., Юсупов Ю.В. Генерация формальной модели системы по требованиям, заданным в нотации USE CASE MAP.....	191
Даишев М.Ш., Котлярова Л.П. Методика отладки на основе воспроизведения трассы исполнения приложения на языке JAVA.....	195
Большев А.К., Лисс А.Р. Прототип эвристической системы обнаружения вторжений в компьютерные сети на основе метода главных компонент.....	200
Амосов В.В., Фёдоров С.А. Подход к разработке математического и программного обеспечения встраиваемых АСНИ и высокоскоростных камер.....	205

Памяти Н.А. Есепкиной

Памяти Нели Александровны Есепкиной.....	211
Иванов С.И., Ипатов А.В., Круглов С.К., Лавров А.П., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г. Выходной модуль радиометра с дистанционным доступом для радиотелескопа RT-32.....	215
Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю. Приборы с зарядовой связью в технике физического эксперимента.....	220
Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Злоказов Е.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С. Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: варианты реализации в схемах когерентных корреляторов изображений.....	227
Лавров А.П., Молодяков С.А., Саенко И.И. Акустооптоэлектронные устройства для радиоастрономических приемных комплексов.....	233
Саенко И.И., Круглов С.К., Розанов С.Б., Соломонов С.В. Оптоэлектронный спектрометр для комплекса дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых волнах.....	243
Сведения об авторах.....	251
Аннотации.....	257



Contents

Problems of transfer and information processing

Kozlov A.V., Lokhanova A.I., Simonchik K.K. <i>Music detection algorithm for speech processing</i>	7
Kruchkovsky V.V., Petrov E.G., Brynza N.A. <i>Informational preference on static form of presenting outgoing data under the conditions of interval uncertainty</i>	11
Simonchik K.K., Galinina O.S., Kapustin A.I. <i>Voice activity detector based on pitch statistics for speaker recognition</i>	18
Gololobov L.I. <i>The compatibility models of mathematical research methods of subsystems «person» and «technics»</i>	23
Kuleshov I.A., Malahov J.A., Duplinskij M.A. <i>Formation of the channel of outflow of the infringer</i>	33

Radio engineering, aerials, SHF devices

Prokopenko N.N., Serebrjakov A.I., Manzhula V.G. <i>Features of designing of differential amplifiers with the raised factor of strengthening at low loading</i>	39
Nedopekin A.E., Kolchev A.A., Shumaev V.V. <i>Inaccuracy of Doppler shift determination by means amplitude-modulated chirp signal</i>	42
Kolchev A.A., Shpak D.G. <i>Quasioptimum of processing broadband LFM signals</i>	48
Rostov N.V. <i>Synthesis and computer-aided optimization of high order digital cascade controllers</i>	53
Prokopenko N.N., Budjakov P.S., Manzhula V.G. <i>Methods of increase of factor of strengthening SiGe-operational amplifiers with low voltage power supplier</i>	58
Rogov S.A., Rozov S.V., Skorokhod V.V. <i>Increase in dynamic range of the acousto-optical spectrum analyzer by means of automatic gain control</i>	62

The system analysis and management

Gollandzev Y.A., Dubeneckii V.A. <i>Information management system for searching partners and projects using erp class systems' tools</i>	67
Brehov A.G., Grishchenko A.A. <i>Aspects of the conceptual device of the theory of control systems of logistics</i>	75

Computers and the software

Kovalev M. S., Dalinger I. M., Myagotin A. V. <i>Formal verification for a CO implementation of the heapsort algorithm</i>	83
Butenko I.V., Ustinov S.M. <i>The method to design of metadata repository for existing system</i>	92

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Boldyrev Y.Ya. <i>Supercomputer technology as the modern realization of multidisciplinary approach in education and scientific activity</i>	99
Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Romanov S.V., Shanina A.S. <i>Modern technologies of mathematical simulation for engineering analysis and civil design</i>	106
Nenashev A.V., Peristaya A.S. <i>The method of the analysis and modelling of nonlinear devices with application of the compensation theorem</i>	112
Zharkovskiy A.A., Kurikov N.N., Pugachev P.V., Shabrov N.N. <i>Computer simulation and visualization of fluid flow in centrifugal pumps</i>	119
Nagorniy V.S., Pshchelko N.S. <i>Bases for calculation of nanostructured films resistance at electric drops-jet formation</i>	123
Kozlov A.N. <i>Mathematical model for calculation of the directivity diagram of the pin of the open plug socket</i>	130

Basyrov A.G. <i>Conceptual model of energy-efficient computational processes in special-purpose computer systems</i>	135
Utakaeva I.H., Kochkarov A.A. <i>To a question on algorithms of recognition of prefractal graphs</i>	139
Rutkowski A.L., Bolotaeva I.I., Yurosheva T.A. <i>Modified simplex search algorithm for optimal control of the process parameters of zinc electrolysis</i>	142

Devices, information-measuring systems

Kurochkin L.M. <i>Suballocated information system of industry planning process</i>	147
---	-----

Information and telecommunication technologies in formation

Masyuk A.A., Saradgishvili S.E. <i>The content filtering and management of access to resources of the internet in educational institutions</i>	153
---	-----

Conference of students, post-graduate students and young scientists of the Northwest «Technologies Microsoft in the theory and programming practice»

Efimov M.Y. <i>Development and realization of C# compiler front end using Microsoft Phoenix</i>	164
Voinov N.V., Kotlyarov V.P. <i>Applying the method of heuristics for the optimal set of test scenarios generation</i>	169
Mukhanov R.S., Safonov V.O. <i>Development and practical application of ASPECT.NET system targeted at academic .NET framework</i>	174
Veselov A.O., Kotlyarov V.P. <i>Testing automation of projects in telecommunication domain</i>	180
Drobintsev P.D., Daishev M.S., Kotlyarov V.P. <i>Integrated environment for testing automation based on eclipse platform</i>	186
Nikiforov I.V., Petrov A.V., Yusupov Y.V. <i>Generation of formal model of a system from requirements specified in use case map</i>	191
Daishev M.Sh., Kotlyarova L.P. <i>Java-applications debugging technique on basis of playback application's execution trace</i>	195
Bolshev K.A., Liss A.R. <i>Heuristic network intrusion detection system prototype based on principal component analysis</i>	200
Amosov V.V., Fyodorov S.A. <i>New approach to developing mathematical support and software of embedded automated research systems and high speed cameras</i>	205

N.A.Esepkinoy's memories

<i>Nelya Aleksandrovna Esepkina memories</i>	211
Ivanov S.I., Ipatov A.V., Kruglov S.K., Lavrov A.P., Mardyshkin V.V., Mikhailov A.G. <i>The back-end radiometer module with remote access for radio telescope RT-32</i>	215
Gavrilov G.A., Sotnikova G.Yu. <i>CCD-Detectors in technology of physical experiments</i>	220
Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu., Rodin V.G., Starikov R.S. <i>Invariant correlation filters with linear phase coefficient: variants of realization in optoelectronic image correlators</i>	227
Lavrov A.P., Molodykov S.A., Saenko I.I. <i>Acousto-opto-electronic devices for radio astronomical receivers</i>	233
Saenko I.I., Kruglov S.K., Rozanov S.B., Solomonov S.V. <i>Optoelectronic spectrometer for atmosphere remote sensing at millimeter waves</i>	243
<i>About the authors</i>	251
<i>Abstracts</i>	257

АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ РЕЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

В различных приложениях, используемых для обработки речи, возникает необходимость обнаружения и подавления (маскирования) музыкальных фрагментов [1–3].

На сегодняшний день это особенно актуально для таких сфер применения, как задачи речевой обработки, анализ контента (Интернет, радио, телевидение), создание современных слуховых аппаратов.

Данная работа, в первую очередь, ориентирована на применение в задачах речевой обработки, таких, как идентификация и верификация диктора по голосу, распознавание речи и т. п. Для этих целей необходимо, прежде всего, выделить из входного сигнала речевые фрагменты, отбросив паузы и участки, содержащие различные виды помех. В контексте этой задачи музыка представляет собой помеху, которую необходимо детектировать и исключить из дальнейшего анализа. Таким образом, детектор музыки – неотъемлемая часть предварительной обработки сигнала, цель которой – выделение фрагментов, на которых применение алгоритмов речевой обработки является корректным.

Для других приложений музыкальные фрагменты могут, напротив, рассматриваться не как помехи, а как целевые. Тем не менее, алгоритм детектирования музыкальных фрагментов также применим и для этих задач.

Алгоритмы детектирования музыкальных фрагментов

Решается задача анализа речевого сигнала на предмет наличия музыкальных фрагментов. Предполагается, что помимо музыки речевой сигнал может также содержать речь, паузы и различного рода помехи. Необходимо провести анализ звукового сигнала и автоматически уста-

новить границы музыкальных и немзыкальных фрагментов.

Существующие методы детектирования музыкальных фрагментов. Для решения задачи детектирования музыкальных фрагментов имеется несколько подходов, опирающихся на различные признаки и применяющих различные классификаторы.

Для анализа сигнала, как правило, используется его осциллограмма, либо спектрограмма. Под понятием «спектрограмма» понимаем функцию частотно-временного представления сигнала $x(m)$, полученную с помощью преобразования Фурье:

$$X(n, k) = \sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x(hn + m)w(m)e^{\frac{2i\pi mk}{N}}, \quad (1)$$

где $w(m)$ – весовое окно (например, Хэмминга); N – размер окна анализа; h – шаг смещения окна; n – номер окна анализа; k – частотный индекс.

Прежде всего рассмотрим некоторые из множества отличий, наблюдающихся между музыкальным и речевым сигналами [1].

- Наиболее известной характеристикой речевого сигнала является основной тон. Эта характеристика представляет собой частотную модуляцию сигнала. Речевой сигнал имеет единственный основной тон, тогда как музыкальный сигнал может иметь различное количество основных тонов.

- Частота основного тона человека колеблется в пределах 50–500 Гц, диапазон изменения частоты основного тона музыкального сигнала может быть значительно шире.

- Более 90 % мощности речевого сигнала находится в диапазоне до 4 кГц, музыкального – до 20 кГц.

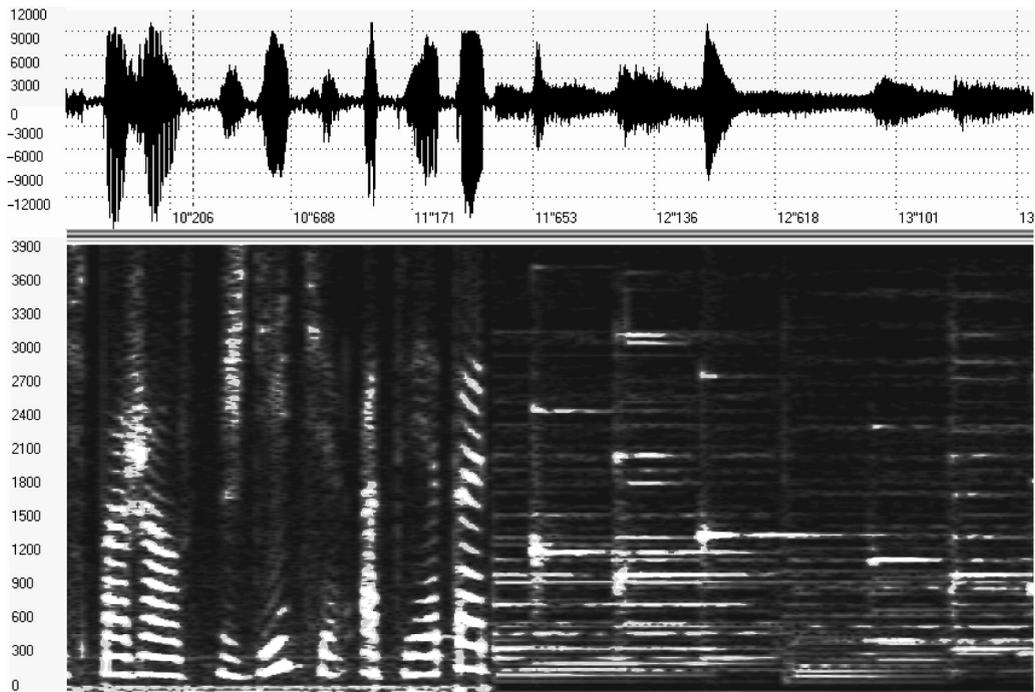


Рис. 1. Осциллограмма и спектрограмма сигнала, содержащего речевые (слева) и музыкальные (справа) участки

- Средний спектр речевого сигнала имеет весьма специфическую форму, тогда как форма спектра музыкального сигнала может быть произвольной.

- В результате слоговой динамики речи длительность основного тона имеет малую вариативность, для музыки, напротив, характерна большая вариативность длительности тона.

- Для основного тона и гармоник речевого сигнала наблюдается плавное изменение частоты. Частота основного тона для большинства музыкальных инструментов плавно изменяться не может.

Рассмотренные различия между музыкальным и речевым сигналом нашли свое отражение в тех или иных признаках, вычисляемых для определения вида сигнала [1–7].

Наиболее часто применяются следующие признаки:

частота пересечения нуля (zero crossing rate)

$$ZCR = 0,5 \sum_{n=1}^N |\text{sgn}[x(n)] - \text{sgn}[x(n-1)]|; \quad (2)$$

динамика изменения спектра во времени (spectral flux)

$$SF = \|X_i - X_{i-1}\|; \quad (3)$$

спадание спектра (roll-off)

$$F_i : \sum_{k=1}^{F_i} X^2(k) = 0,95 \sum_{k=1}^K X^2(k); \quad (4)$$

центр масс спектра (spectral centroid)

$$SC = \frac{\sum_{k=1}^K kX(k)}{\sum_{k=1}^K X(k)}; \quad (5)$$

кепстральные коэффициенты (cepstral coefficients);

частоты основных тонов (fundamental frequencies);

длительная активность частоты (continuous frequency activation)

и пр.

Исследование различных работ свидетельствует о том, что при проведении разделения непосредственно по значениям признаков, ошибка классификации составляет не менее 15 %. Улучшение результатов классификации может быть достигнуто, если принимать во внимание некоторую совокупность признаков. Механизмы принятия решения по совокупности признаков также варьируются от простой линейной комбинации до применения нейронных сетей и прочих классификаторов. Однако в результате такого подхода алгоритмы выделения музыкальных фрагментов приобретают трудоемкость, неприемлемую для их применения как вспомогательных в приложе-

ниях, работающих в реальном времени. Также стоит отметить, что выбор эффективной комбинации признаков представляет собой непростую задачу, которая, как правило, решается перебором различных комбинаций и влечет за собой большие вычислительные затраты [1–7].

Алгоритм детектирования музыкальных фрагментов на основе анализа изменения мощности спектральных максимумов. Предпосылкой разработки данного алгоритма является то, что динамика изменения во времени спектрограммы речевого сигнала отличается по своим характеристикам от динамики изменения спектрограммы музыкального сигнала. Музыкальные фрагменты фонограммы в своем спектральном представлении имеют больше стационарных участков, чем речевые фрагменты, что приводит к появлению в спектрограмме звукового сигнала хорошо заметных горизонтальных полос (рис. 1), являющихся следствием длительных музыкальных тонов.

Подобное изменение спектрограммы можно отследить с помощью анализа динамики спектра во времени. Как правило, используется следующая статистика (spectral flux) [8]:

$$SF(n) = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} H(|X(n, k)| - |X(n-1, k)|), \quad (6)$$

где $H(x) = \frac{x + |x|}{2}$ – функция ограничения сигнала x до области неотрицательных значений.

В данной статье предлагается использовать модифицированный алгоритм отслеживания динамики изменения спектра. Во-первых, производится предобработка спектрограммы для выделения частотных областей, содержащих пики спектральной плотности $X(n, k)$. Во-вторых, с целью уменьшения чувствительности алгоритма к изменениям мощности сигнала, применяется нормализация. И, наконец, отслеживаются не только положительные, но и отрицательные изменения мощности по частотным полосам спектрограммы.

Рассмотрим более подробно основные этапы вычислений алгоритма.

1) Вычисление спектрограммы. Входной сигнал предварительно приводится к частоте дискретизации 11 025 Гц. Далее, с использованием весового окна Хэмминга, вычисляется спектрограмма $X(n, k)$ входного сигнала. Экспериментальным путем были установлены оптимальные параме-

тры размера окна анализа (1024 отсчета), и шага окна анализа (256 отсчетов).

2) Вычитание сглаженного спектра. Для определения сглаженного спектра используется однородный фильтр, применяемый к амплитуде сигнала в частотной области:

$$Td(n, k) = \frac{1}{L} \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} X(n, \min(\max(k+l, 1), N)), \quad (7)$$

где параметр L – размерность фильтра, был выбран экспериментально равным 21.

$$X_{\text{emph}}(n, k) = X(n, k) - Td(n, k). \quad (8)$$

Вычитание сглаженного спектра служит для усиления слабых максимумов, что дает возможность учесть их в последующем анализе.

3) Ограничение до области неотрицательных значений:

$$X'(n, k) = H(X_{\text{emph}}(n, k)), \quad (9)$$

где

$$H(x) = \frac{x + |x|}{2}. \quad (10)$$

4) По соседним кадрам вычисляются статистики, отражающие динамику спектра:

$$SF'(n) = \frac{\left[\sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} |X'(n, k) - X'(n-1, k)| \right]}{\left[\sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X'(n, k) + X'(n-1, k) \right]}. \quad (11)$$

С целью уменьшения чувствительности алгоритма к изменениям мощности сигнала применена нормализация на суммарную мощность сигнала по двум кадрам.

5) Далее, для выделения фрагментов, содержащих музыку, используется пороговый классификатор, срабатывающий на участках, где значение функции $SF'(n)$ принимает значение менее некоторого порога R_0 . Для увеличения надежности, решение принималось на основании статистики значений $SF'(n)$, накопленной на двухсекундном интервале. Точность границ музыкальных и немзыкальных фрагментов достигается за счет перекрытия фрагментов анализа, по которым рассчитывается статистика $SF'(n)$.

На рис. 2 представлена схема всей системы, реализующей оценку модифицированного потока спектра.

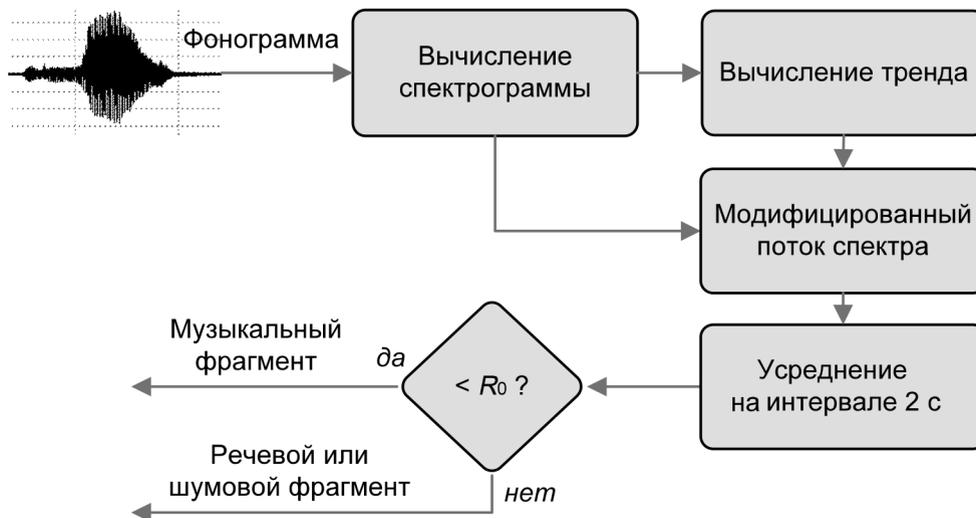


Рис. 2. Схема работы детектора музыки на основе анализа динамики спектральных максимумов

Экспериментальные исследования детектора музыкальных фрагментов. Методика оценки качества алгоритмов детектирования музыки включает в себя подбор аудиобазы данных, применение алгоритма и расчет ошибок детектирования первого и второго рода.

Для тестирования использовалась база ISMIR 2004, включающая в себя около 1400 музыкальных записей различных жанров, ритмов и уровня громкости [2, 3], а также речевая база данных, содержащая около 1000 фонограмм.

Ошибки вычисляются следующим образом. Пусть S_{music} – множество всех музыкальных сегментов фонограммы, S_{speech} – множество речевых сегментов. Результатом работы алгоритма являются два множества сегментов, определенных алгоритмом как музыкальные S'_{music} и речевые S'_{speech} . Тогда вероятность ошибки ложного детектирования музыки (false accept rate, FAR) вычисляется как отношение общей длины фрагментов речи или шума, определенных алгоритмом как музыкальные, к общей длительности немзыкальных фрагментов на фонограмме:

$$FA = \frac{Length(S'_{music} \cap S_{speech})}{Length(S_{speech})}. \quad (12)$$

Вероятность ошибки ложного отклонения музыки (false reject rate, FRR) вычисляется как отношение общей длины фрагментов музыки, определенных алгоритмом как речевые, к общей длительности немзыкальных фрагментов на фонограмме:

$$FR = \frac{Length(S'_{speech} \cap S_{music})}{Length(S_{music})}. \quad (13)$$

При этом выполняется соотношение:

$$\begin{aligned} Length(S_{speech} \cup S_{music}) &= \\ = Length(S'_{speech} \cup S'_{music}) &= L, \end{aligned} \quad (14)$$

где L – общая длина фонограммы.

Для оценки качества алгоритмов порог R_0 выбирается таким образом, чтобы оценить равновероятную ошибку (Equal error rate):

$$EER = FR = FA.$$

В таблице представлены результаты сравнительного анализа наиболее популярных алгоритмов, применяемых на практике, а также предлагаемого алгоритма на основе анализа изменения мощности локальных максимумов спектра.

Сравнительный анализ алгоритмов детектирования музыкальных фрагментов

Применяемые на практике алгоритмы	
Признак	EER
Частота пересечения нуля	19 %
Спадание спектра	21 %
Центр масс спектра	25 %
Динамика изменения спектра во времени	23 %
Предлагаемый алгоритм	
Признак	EER
Динамика локальных максимумов спектра	11 %

Как видно из таблицы, значение равновероятной ошибки предложенного алгоритма приблизительно в два раза ниже используемых на практике алгоритмов. Данное наблюдение подтверждает гипотезу о том, что на речевых фрагментах изменение положения спектральных максимумов происходит более динамично. Это обусловлено особенностью спектра человеческой речи, максимумы которого определяются значениями гармоник частоты основного тона, постоянно меняющегося в процессе произнесения. Большинство музыкальных инструментов (в первую очередь, струнные) не имеют возможности менять свои характеристики в процессе генерации звука, поэтому динамика спектра, оцениваемая алгоритмом, мала.

Для решения задачи детектирования музыкальных фрагментов проведен обзор существующих

методов. Рассмотренные методы нельзя рекомендовать для применения на практике в силу либо большой ошибки детектирования, либо неприемлемой вычислительной сложности.

В результате анализа особенностей музыкального сигнала, отличающих его от речевого, предложен новый алгоритм детектирования музыкальных фрагментов на основе динамики спектральных максимумов. Экспериментальные исследования на представительной базе показали, что предложенный алгоритм имеет большую эффективность по сравнению с существующими аналогами. Полученный уровень ошибки 11 %, а также небольшая вычислительная сложность данного алгоритма удовлетворяют требованиям реальных приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Al-Shoshan, A.I.** Speech and Music Classification and Separation: A Review [Текст]/A.I. Al-Shoshan//Journal of King Saud University.–2006.–Vol. 19. –Engineering Sciences (1). –P. 95–133.

2. [Электронный ресурс] http://www.music-ir.org/mirex/2009/index.php/Main_Page MIREX - Music Information Retrieval Evaluation eXchange

3. [Электронный ресурс] <http://www.ismir.net/> ISMIR - The International Society for Music Information Retrieval

4. **Barbedo, J.G.A.** Robust and Computationally Efficient Speech/Music Discriminator [Текст]/J.G.A. Barbedo, A.A Lopes//Journal of the Audio Engineering Society.–2006.–Vol. 55.–№ 7/8.–P. 571–588.

5. **Carey, M.J.** Comparison of features for speech,

music discrimination [Текст]/M.J. Carey, E.S. Parris, H.A Lloyd-Thomas//In Proc. 1999 IEEE International conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing.–1999.–Vol. 1.–P. 149–152.

6. **Scheirer, E.** Construction and evaluation of a robust multifeature speech/music discriminator [Текст]/E. Scheirer, M. Slaney//In Proc. IEEE International conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing.–1997.–Vol. 1.–P. 1331–1334.

7. **Widmer, G.** Automatic music detection in television productions [Текст]/G. Widmer [et al.]/In Proc. of the International conf. on Digital Audio Effects.–2007.

8. **Dixon, S.** Onset detection revisited. [Текст]/S. Dixon//In Proc. of the International conf. on Digital Audio Effects.–2006.–P. 133–137

УДК 519.81

В.В. Крючковский, Э.Г. Петров, Н.А. Брынза

ИНФОРМАТИВНАЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С незапамятных времен человечество, используя бессмертный метод проб и ошибок, интуицию и опыт, вырабатывало наилучшие решения в самых различных областях. Принятие решений в каждой реальной задаче – проблема многослож-

ная, обусловленная разнообразием объективно существующих альтернатив и ограниченная возможностями лица, принимающего решение (ЛПР).

В условиях широкого и интенсивного внедрения информационных технологий и вычисли-

тельной техники как инструмента автоматизации интеллектуальной деятельности, формализация процессов принятия решений во многом определяет перспективы развития автоматизированных информационно-управляющих систем, степень их эффективности и интеллектуализации.

Несмотря на разнообразие проблемно-предметных областей, процедуру принятия решений можно формально разделить на следующие этапы:

формирование и анализ цели;

выделение множества допустимых решений, обеспечивающих ее достижение;

определение метрики (критериев), в которой сравниваются альтернативные решения по их эффективности (этап оценивания);

выбор экстремального в заданной метрике решения (этап оптимизации).

Не умаляя важности каждого из перечисленных этапов, необходимо подчеркнуть концептуальную важность и трудность формализации этапа оценивания. Это связано с тем, что необходимыми условиями эффективности любого решения являются его своевременность, комплексность, т. е. степень и глубина учета различных факторов, определяющих частные аспекты его эффективности, и оптимальность [1]. В формальном плане это приводит к необходимости оценивать эффективность решения по множеству противоречивых частных критериев, имеющих различную размерность, важность, измеренных в различных шкалах. Эта проблема известна как проблема многофакторного оценивания. Магистральный, конструктивный путь решения проблемы многофакторного оценивания связан с теорией полезности [2], основной гипотезой которой является предположение о существовании обобщенной скалярной оценки полезности (эффективности) решения как некоторой функции частных характеристик (критериев).

По необходимости, стремление удовлетворить условие комплексности (полноты) решения приводит к двум следствиям:

увеличению размерности кортежа входных переменных, т. е. к общему усложнению постановки задачи, ее формальной модели и повышению вычислительной сложности;

росту размерности кортежа выходных переменных, что означает необходимость при выборе оптимального решения учитывать множество частных критериев, т. е. решать задачу не скаляр-

ной, а многокритериальной оптимизации вида:

$$x^0 = \arg \underset{x \in X}{extr} \langle k_i(x) \rangle, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $k_i(x)$, $i = \overline{1, n}$ – разнородные частные критерии, совокупность которых достаточно полно и однозначно характеризует эффективность решений $x \in X$; X – множество допустимых решений.

Увеличение размерности задачи принятия решений по входу и выходу влечет за собой повышение информационной неопределенности за счет так называемых НЕ-факторов [2]: неполноты знаний, неточности моделей, описывающих взаимосвязи переменных, неопределенности задания целей, неточности измерений и т. д.

Еще одним источником неопределенности является принципиальная особенность решения задач многокритериальной оптимизации. В силу противоречивости частных критериев $k_i(x)$, задача (1) в общем случае является некорректной, т. к. не имеет единственного решения, а позволяет определить только некоторое подмножество решений, известное как область компромиссов X^C или Парето-оптимальных решений [3, 4]. Выбор из этой области единственного (компромиссного) решения связан с необходимостью регуляризации исходной некорректной задачи, путем дополнения модели (1) схемой компромисса.

Существует множество различных схем компромисса: принцип главного критерия, последовательной оптимизации, функционально-стоимостного анализа, анализа иерархий и др. [5].

Несмотря на различия, все эти схемы базируются на одной идее – трансформации исходной задачи многокритериальной оптимизации в задачу однокритериальной скалярной оптимизации или иерархически упорядоченную последовательность таких задач. Наиболее полно и корректно эта идея реализуется путем формирования обобщенной скалярной многокритериальной оценки, известной как полезность решения [2]. В этом случае скалярная оценка эффективности любого решения $x_j \in X$ определяется функцией полезности вида:

$$P^*(x_j) = F[(\lambda_j, k_j(x_j))]; \quad j = \overline{1, m},$$

где λ_j – коэффициенты, приводящие разнородные частные критерии к изоморфному виду, т. е. к одной размерности, одинаковому интервалу возможных значений и т. д.; F – оператор, определяющий структуру модели многокритериального

оценивания (функции полезности); $x_j \in X$ – множество допустимых решений.

В конкретных случаях возникают затруднения с корректным определением значений коэффициентов изоморфизма λ_i . В связи с этим на практике широко используется нормализованная функция полезности вида:

$$P(x_j) = F[(a_i, k_i^H(x_j))], \quad (2)$$

где $k_i^H(x_j)$ – нормализованные, т. е. приведенные к безразмерному виду, единому интервалу $[0, 1]$ возможных значений и одинаковому направлению доминирования, частные критерии; a_i – безразмерные коэффициенты относительной важности нормализованных частных критериев. По определению, для коэффициентов a_i должны выполняться следующие требования:

$$0 \leq a_i \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, n}; \quad \sum_{i=1}^n a_i \leq 1.$$

В настоящее время предложено несколько различных проблемно-ориентированных форм функции полезности (2), отличающихся структурой, т. е. видом оператора F , модели оценивания. Наиболее широко используется аддитивная

$$P(x_j) = \sum_{i=1}^n a_i k_i^H(x_j); \quad (3)$$

мультипликативная

$$P(x_j) = \prod_{i=1}^n a_i k_i^H(x_j); \quad (4)$$

модель Кобба-Дугласа

$$P(x_j) = \prod_{i=1}^n [k_i^H(x_j)]^{\alpha_i}, \quad \alpha_i > 0; \quad (5)$$

мультипликативно-аддитивная

$$P(x_j) = \beta \left[\sum_{i=1}^n a_i k_i^H(x_j) \right] + (1 - \beta) \prod_{i=1}^n k_i^H(x_j), \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (6)$$

формы функций полезности.

Все приведенные виды функции полезности являются частными случаями (фрагментами) полинома Колмогорова–Габор [6]:

$$P(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i k_i(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} k_i(x) k_j(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijl} k_i(x) k_j(x) k_l(x). \quad (7)$$

Для каждой конкретной ситуации принятия решений необходимо решить задачу структурно-параметрической идентификации, т. е. определить конкретный вид модели в рамках полинома Колмогорова–Габор и численные значения параметров. В силу того, что процедура оценивания является субъективной интеллектуальной процедурой, источником необходимой информации для решения задач идентификации модели скалярного оценивания служит пользователь (эксперт или лицо, принимающее решение). При этом, независимо от методов получения и обработки экспертной информации, оценки параметров (весовых коэффициентов a_i) всегда являются интервальными за счет разброса субъективных мнений экспертов. Что касается значений частных критериев, то большинство из них также удастся измерить с точностью до конечных интервальных значений.

В расширенном пространстве переменных полином Колмогорова–Габор является линейным по параметрам [7]. Это означает, что если в полиноме заменить мультипликативные и степенные функции частных критериев новыми переменными z_s , то его можно представить в виде линейной аддитивной формы:

$$P(x) = \sum_{s=1}^n a_s z_s(x).$$

С учетом интервальной неопределенности исходной информации модель оценивания скалярной полезности многокритериальных альтернатив будет иметь вид:

$$P(x) = \sum_{s=1}^n \bar{a}_s \bar{z}_s(x), \quad (8)$$

где знаками « $\bar{}$ » обозначены интервальные неопределенности.

Под интервальной неопределенностью будем понимать исходные данные, измеренные в количественных шкалах, т. е. представленные числовыми оценками. При этом в силу НЕ-факторов их невозможно представить в виде «точных» величин, а можно представить в виде некоторых связанных областей на числовых шкалах, которые характеризуют возможные значения параметров в исследуемой ситуации [8].

Результаты расчета по любым моделям также будут интервальными числами. В полной мере это касается моделей многофакторного оценивания (3)–(7).

Конечная цель задачи принятия решений заключается в выборе из допустимого множества решений X наиболее эффективного $x^0 \in X$.

В условиях неопределенности эта задача может быть решена двумя способами.

1. Синтезируется оптимизационная модель выбора решений, проводится ее анализ, в результате которого выявляются все возможные неопределенности и определяются их количественные и качественные характеристики. Все выявленные неопределенности детерминируются, и исходная задача трансформируется в детерминированную оптимизационную задачу, которая решается классическими методами математического программирования. Следует отметить, что при таком подходе теряется очень важная системная информация об общем интервале возможных значений полезности (эффективности) альтернативных решений, а также о взаимосвязи и взаимовлиянии неопределенностей.

2. С учетом всех интервальных неопределенностей параметров и переменных модели оценивания полезности решений вычисляются интервальные скалярные значения полезности для всех альтернативных решений или непосредственно экстремальное решение и его интервальное значение полезности. Затем на основе этой информации производится детерминизация (выбор точечного решения).

Реализация этого подхода связана с необходимостью вычисления обобщенных интервальных значений полезности по модели (8). Анализ исходных моделей (3)–(7) показывает, что для этого достаточно арифметических операций суммирования и умножения (возведения в степень) интервальных величин.

Интервальные арифметики являются специализированными, т. е. проблемно-ориентированными на классы неопределенности. Общим для всех интервальных величин является допущение о том, что границы интервалов известны, поэтому основа их классификации – вид и форма представления информации о характере распределения возможных значений внутри интервала. По этому признаку можно выделить статистическую, нечеткие интервальные неопределенности и интервальные числа.

Если исходные значения являются результатом статистической обработки выборки реальных наблюдений, то характер их распределения на интервале определяется видом и параметрами функции распределения вероятностей. Поэтому такую неопределенность часто называют объективной.

В том случае, если выборка наблюдений, необходимая для корректного определения объективных статистических характеристик, отсутствует или недостаточна, информация о характере распределения значений на интервале может быть восполнена знаниями опытных экспертов. Эти знания могут быть представлены в виде субъективных предположений о статистических характеристиках распределения или в виде нечетких множеств [9], когда эксперт задает характер распределения возможных значений на интервале в виде функции принадлежности $\mu(y)$.

Наконец, ситуацию, когда отсутствует как объективная, так и субъективная информация о характере распределения значений на интервале, будем называть интервальной неопределенностью, характеризующейся границами интервала, внутри которого находится значение переменной [10].

Если все интервальные неопределенности одного вида, то реализация задачи вычисления интервальной полезности (8) не вызывает затруднений, т. к. для каждого класса интервальных неопределенностей известны специализированные арифметики. Приведем правила выполнения операций суммирования и умножения для введенных классов интервальных неопределенностей. При этом будем полагать, что границы интервалов возможных значений a и b во всех случаях заданы.

При вероятностной неопределенности вычисления производятся на основании статистических параметров – математического ожидания и дисперсии. Рассмотрим два крайних случая – нормальный и равновероятный законы распределения вероятностей.

Оценка параметров на основе данных о границах интервала для нормального закона распределения определяется формулами:

математическое ожидание

$$M = \frac{(a + b)}{2}; \quad (9)$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \frac{b - a}{6}; \quad (10)$$

дисперсия

$$D = \sigma^2. \quad (11)$$

Соответственно для равновероятного закона распределения:

$$M = \frac{(a + b)}{2}; \quad (12)$$

$$D = \frac{(b - a)^2}{12}. \quad (13)$$

Арифметические операции со статистическими параметрами выполняются по известным правилам.

Для случая, когда частные критерии и весовые коэффициенты представлены в виде нечетких множеств (нечетких чисел в R, L – форме [9]), вычисление функции полезности (8) производится по следующим формулам сложения и умножения [9]:

$$(a, a, \beta)_{LR} + (b, \gamma, \delta) \sim (a + b, a + \gamma, \beta + \delta)_{LR} \quad (14)$$

$\forall A$, таких, что $\mu_A, \mu_B \in F(R^+)$, $a_1 > 0, a_2 > 0$,

$$(a_1, \beta_1, b_1)_{LR} * (a_2, \beta_2, b_2) \sim (a_1 a_2, a_1 \beta_2 + a_2 \beta_1, a_1 b_2 + a_2 b_1)_{LR}, \quad (15)$$

где a_1, a_2 – левые границы нечетких множеств, b_1, b_2 – правые границы нечетких множеств, β_1, β_2 – модальные значения, при которых функция принадлежности равна единице.

Аналитические правила выполнения арифметических операций с интервальными величинами имеют вид [10]:

$$\begin{cases} A + B = [a_1 + a_2, b_1 + b_2] \\ A \cdot B = [\min\{a_1 a_2, \{a_1 b_2\}, \{a_2 b_1\}, \{b_1 b_2\}\}, \\ \max\{a_1 a_2, \{a_1 b_2\}, \{a_2 b_1\}, \{b_1 b_2\}\}]. \end{cases} \quad (16)$$

В силу особенности решения задачи параметрической идентификации на основе экспертных оценок практически невозможно получить достаточно представительную статистическую выборку для вычисления корректных статистических оценок параметров. Поэтому они чаще всего задаются в виде нечетких множеств или просто интервальных величин. Что касается значений частных критериев, то их получают из различных источников и поэтому они могут быть заданы в статистической, нечеткой форме или в виде интервальных величин.

Таким образом, в общем случае модель оценки полезности (8) содержит переменные и параметры различных видов. В связи с этим возникает необходимость приведения всех их к одному базису. По степени информативности интервальные неопределенности можно ранжировать следующим образом: статистическая \succ нечеткая \succ интервальная.

Очевидно, что в качестве базовой можно принять только одну из субъективных форм представления неопределенности – нечеткую или интервальную. Такая трансформация связана с увеличением неопределенности при переходе от более информативных форм к менее информативным, что выражается в увеличении интервалов возможных значений. При этом возникает вопрос о величине погрешности определения обобщенного интервального значения полезности (8) при переходе от более информативных форм к менее информативным.

С этой целью было проведено тестовое вычисление интервальных значений обобщенной функции полезности для различных видов интервальной неопределенности исходной информации.

Вычислительный эксперимент. Эксперимент заключается в вычислении и сравнении значений интервалов неопределенности и модальных (средних) значений полезности решения $P(x)$ при различных видах неопределенности исходных данных модели (8). Рассмотрены статистическая (в форме нормального и равномерного законов распределения возможных значений), нечеткая (в виде нечетких R, L – чисел) и заданная в виде интервальных величин неопределенности.

Для обеспечения сравнимости результатов расчетов, границы интервалов исходных данных и их величина принимались одинаковыми, а в качестве средних или модальных значений использовались их центры. С целью упрощения расчетов и повышения их наглядности весовые коэффициенты частных критериев принимались детерминированными, а $k_i(x)$ задавались в интервальном виде.

Чтобы можно было сделать корректные выводы, рассмотрены ситуации различной размерности по числу частных критериев $k_i(x)$, $i = \overline{1, n}$; $n = 2, 4, 7$ и различные (линейная и нелинейная) сложности модели полезности (8).

Для линейной аддитивной модели вида

$$P(x) = \sum_{i=1}^n a_i k_i(x), \quad n = 2, 4, 7, \quad (17)$$

а также для нелинейных моделей, представленных в виде следующих фрагментов полинома Колмогорова–Габора:

размерность $n = 2$

$$P(x) = a_1 k_1(x) + a_2 k_2(x) + a_3 k_1(x) k_2(x), \quad (18)$$

размерность $n = 4$

$$P(x) = a_1 k_1(x) + a_2 k_2(x) + a_3 k_3^2(x) + a_4 k_2(x) k_4(x), \quad (19)$$

размерность $n = 7$

$$P(x) = a_1 k_1(x) + a_2 k_2(x) + a_3 k_3^2(x) + a_4 k_1(x) k_4(x) + a_5 k_5(x) k_6(x) + a_6 k_7^2(x), \quad (20)$$

были проведены расчеты интервальных значений функций полезности с исходными данными, приведенными в табл. 1.

Для удобства анализа сводные результаты расчета интервальных значений функций полезности по аддитивной и полиномиальным моделям приведены в табл. 2.

Интервальные характеристики функции полезности, границы интервалов, а также величины

интервалов были вычислены для случаев, когда интервальные значения частных критериев распределены по нормальному или равновероятному законам (статистическая неопределенность); заданы в виде нечетких чисел; заданы в виде интервальных величин. Вычисления проводились по формулам (9)–(16), соответствующим каждому виду неопределенности.

Зависимости изменения величины интервальной неопределенности аддитивной и полиномиальной функций полезности от размерности (числа частных критериев) приведены, соответственно, на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 1

Исходные данные

Частные критерии	Весовые коэффициенты
<i>Размерность $n = 2$</i>	
$k_1 = [0,1, 0,25], k_2 = [0,3, 0,44]$	$a_1 = 0,6, a_2 = 0,15, a_3 = 0,25$
<i>Размерность $n = 4$</i>	
$k_1 = [0,2, 0,3], k_2 = [0,45, 0,6], k_3 = [0,7, 0,75], k_4 = [0,15, 0,25]$	$a_1 = 0,2, a_2 = 0,25, a_3 = 0,15, a_4 = 0,4$
<i>Размерность $n = 7$</i>	
$k_1 = [0,15, 0,2], k_2 = [0,8, 0,92], k_3 = [0,66, 0,8], k_4 = [0,4, 0,65], k_5 = [0,2, 0,35], k_6 = [0, 0,35], k_7 = [0,5, 0,75]$	$a_1 = 0,15, a_2 = 0,1, a_3 = 0,35, a_4 = 0,12, a_5 = 0,17, a_6 = 0,11, a_7 = 0,3$

Таблица 2

Интервальные значения различных функций полезности

Вид неопределенности	Аддитивная модель	Полиномиальная модель
<i>Размерность $n = 2$</i>		
1. Статистическая нормальный закон	0,123223	0,092422
равновероятный закон	0,213429	0,160093
2. Нечеткие числа	0,288	0,24575
3. Интервальные величины	0,148	0,131
<i>Размерность $n = 4$</i>		
1. Статистическая нормальный закон	0,058843	0,0425118
равновероятный закон	0,101919	0,0736735
2. Нечеткие числа	0,4225	0,4485
3. Интервальные величины	0,105	0,101375
<i>Размерность $n = 7$</i>		
1. Статистическая нормальный закон	0,094376	0,0143229
равновероятный закон	0,163463	0,0253931
2. Нечеткие числа	0,5635	0,6073
3. Интервальные величины	0,1955	0,15464

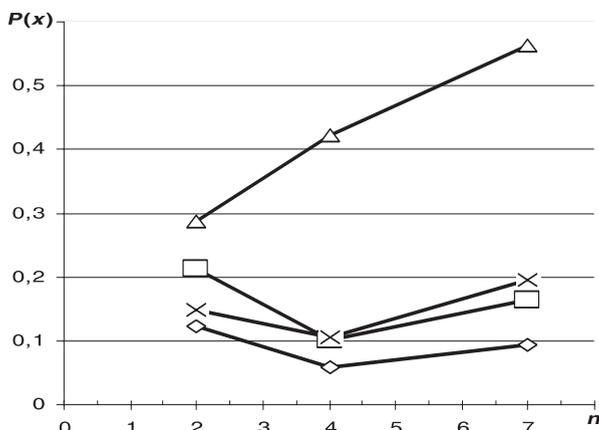


Рис. 1. Зависимость интервала аддитивной функции полезности от числа частных критериев n

- (◇) нормальный закон;
- (□) равновероятный закон;
- (△) нечеткие числа;
- (×) интервальные величины

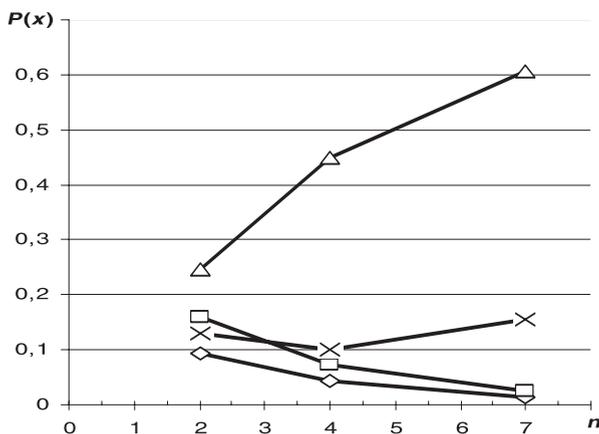


Рис. 2. Зависимость интервала полиномиальной функции полезности от числа частных критериев n

- (◇) нормальный закон;
- (□) равновероятный закон;
- (△) нечеткие числа;
- (×) интервальные величины

Анализ результатов тестовых расчетов убедительно подтвердил, что в условиях интервальной неопределенности наиболее информативна статистическая форма представления исходных данных. При этом, во всех без исключения случаях нормальный закон распределения вероятности дает меньший интервал неопределенности по сравнению с законом равной вероятности в среднем на 75 %. Однако к мощности и качеству исходной статистической выборки, по которой определяются распределения, предъявляются значительно более высокие требования.

С этих позиций объяснима близость интервальных результатов, полученных для исходных данных, распределенных по закону равной вероятности и заданных в виде интервальных величин. В первом случае интервалы меньше в среднем на 27 %.

Следует отметить слабую коррелированность величины расчетных интервальных значений функции полезности решений от размерности (числа частных критериев n) и сложности модели для ситуаций, когда исходная информация задана в статистической форме (a, b) и в виде интервальных величин.

Неожиданным являются существенно большие значения интервалов неопределенности обобщенной полезности решений, полученные при задании исходной информации (значений частных критериев) в виде нечетких множеств (нечетких чисел). Теория предполагает, что назначение функций принадлежности частично снимает неопределенность за счет привлечения знаний и опыта экспертов. Однако это не подтверждается результатами вычислительного эксперимента. Величина интервалов, вычисленных по исходной информации, заданной в форме нечетких чисел в 2–4 раза превосходит значения интервалов, вычисленных по исходным данным, заданным в форме интервальных величин, и очень чувствительна к размерности и сложности модели. Вероятно, это связано с тем, что первоначально теория нечетких множеств была предложена для формализации качественной информации, представленной в форме вербальных высказываний (лингвистических переменных). Последующее ее расширение на количественную информацию, например, нечеткие числа, возможно, является малоэффективным по сравнению с теорией интервальных вычислений. Однако это предположение нуждается в более глубоком анализе и подтверждении большим количеством вычислительных экспериментов.

По результатам исследований, в качестве базисных форм представления исходных разнородных по форме представления данных (частных критериев) при решении задач многокритериальной оптимизации можно рекомендовать статистическое представление в виде интервала с равновероятным законом распределения и представления в форме нечетких интервальных величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков, В.М. Введение в АСУ [Текст]/ В.М. Глушков. –Киев: Техника, 1972.–312 с.
2. Фишберн, П. Теория полезности для принятия решений [Текст]/П. Фишберн.–М.: Наука, 1978.–352 с.
3. Петров, К.Э. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания: Монография [Текст]/ К.Э. Петров, В.В. Крючковский. –Херсон: Олди-плюс, 2009.–294 с.
4. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст]/В.В. Подиновский, В.Д. Ногин.–М.: Наука, 1982.–254 с.
5. Петров, Э.Г. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах [Текст]/Э.Г. Петров, М.В. Новожилова, И.В. Гребенник [и др.].–Херсон: Олди-плюс, 2003.–380 с.
6. Ивахненко, А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей [Текст]/А.Г. Ивахненко, И.А. Мюллер.–К.: Техника, 1985.–233 с.
7. Cover, T.M. Geometrical and statistical of systems of linear inequalities with applications in pattern recognition [Текст]/T.M. Cover//IEEE Trans. On Electronic Computers.–1965.–№ 14–Р. 326–334.
8. Стерпин, М.Ю. Метод представления знаний в интеллектуальных системах поддержки экспертных решений [Текст]/М.Ю. Стерпин, Г.И. Шевелев//Новости искусственного интеллекта.–2003–№ 4(58), С. 24–33.
9. Борисов, А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений [Текст]/А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев [и др.].–М.: Радио и связь, 1989.
10. Алефельд, Г. Введение в интервальные вычисления [Текст]/Г. Алефельд, Ю.Херцбергер; пер. с англ.–М.: Мир, 1987.–360 с.

УДК 621.391

К.К. Симончик, О.С. Галинина, А.И. Капустин

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕЧЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИК ОСНОВНОГО ТОНА В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИКТОРА

В настоящее время активно развивается направление голосовой биометрии, включающее две смежные задачи распознавания диктора по голосу: задачу верификации, состоящую в определении личности говорящего, и задачу идентификации, отвечающую за проверку принадлежности фонограммы конкретному диктору. Открытым остается вопрос, связанный с улучшением качества работы алгоритмов верификации/идентификации в реальных условиях и снижением вероятности ошибки.

На стадии предобработки сигнала в системах распознавания диктора по голосу важную роль играет детектор речевой активности (англ. voice activity detector, VAD) – алгоритм, классифицирующий исходные участки фонограммы как речь или не речь. VAD представляет собой один из компонентов предобработки речевого сигнала в приложениях, работающих с голосовыми данными, и наиболее широко применяется в сфере теле-

коммуникаций и телефонии [1]. Помимо этого, алгоритмы VAD используются в задачах распознавания речи [2, 3] и диктора [4, 5], локализации источника речевого сигнала, улучшения качества речи и т. д.

Вопрос качественного выделения участков речи тщательно исследуется специалистами различных направлений. Основное внимание уделяется выделению шумоустойчивых признаков и выбору правил классификации речь/не речь. Чаще всего используются алгоритмы на основе анализа энергии сигнала, обнаружения основного тона [1], спектрального и кепстрального анализа [4], измерений числа переходов сигнала через нуль [1], статистическом моделировании [6], информационном подходе [1], использования порядковых фильтров [3], а также алгоритмы, основанные на объединении разных подходов. Но, несмотря на значительное количество реализаций VAD и глубокие исследования в этой области, существую-

щие решения не полностью отвечают требованиям, продиктованным особенностями задачи распознавания диктора по голосу.

В данной статье предлагается новый алгоритм VAD, являющийся модификацией алгоритма на основе статистик основного тона, предложенного в [7]. VAD исследуется как компонент системы распознавания диктора по голосу, в связи с чем основной целью его работы является улучшение качества работы системы в целом. На примере предложенной модификации алгоритма VAD и алгоритма VAD на основе энергии проводится анализ влияния выбора VAD на качество системы распознавания диктора.

VAD в задаче верификации диктора по голосу

Рассматривается система автоматической верификации по голосу на основе моделей смесей гауссовских распределений (СГР) и классификации методом опорных векторов (англ. support vector machine, SVM), подробно описанная в [8]. В качестве информативных акустических признаков выбраны мелчастотные кепстральные коэффициенты (англ. mel-frequency cepstral coefficients, MFCC).

В рассматриваемой задаче необходимо тщательно контролировать характер звуковых данных, подаваемых на вход системы обучающих и тестовых данных, не допуская обработки неречевых фрагментов сигнала, поскольку рассматриваемая система очень чувствительна к подобного рода ошибкам.

Для оценки качества системы используется стандартный для задач распознавания образов критерий – результирующее значение равновероятной ошибки пропуска/отклонения всей системы верификации (англ. equal error rate, EER):

$$ERR = FA = FR \quad (1)$$

где FR (false reject) – вероятность ложного отка-

за (вероятность ошибки первого рода); FA (false acceptance) – вероятность ложной идентификации (вероятность ошибки второго рода).

На вход алгоритма верификации подаются акустические признаки, выделенные на речевых сегментах фонограммы. Сегментация на участки речь/не речь является результатом работы алгоритма, типичный пример использования VAD в системе верификации изображен на рис. 1.

Основные подходы к выделению речевых участков. В связи с широким применением алгоритмов детектирования речевой активности предложено множество подходов к классификации участков речь/не речь. Тем не менее, к настоящему времени не найдено универсальных алгоритмов, демонстрирующих высокое качество работы в различных приложениях.

Для мобильной и IP-телефонии используются, в частности, алгоритмы, описанные в стандартах ITU-T и ETSI. Например, в [9] приводится сравнение алгоритмов VAD стандарта G.729 и адаптивного кодирования с переменной скоростью (англ. adaptive multi rate, AMR), а также алгоритма FVAD, являющегося доработкой G.729. Первый алгоритм реализует подход, основанный на характеристике, определяющейся количеством переходов через нуль (zero crossing rate, ZCR), а также использующий информацию о мощности сигнала как во всей полосе частот, так и в отдельных частотных полосах. Вторым алгоритмом используется оценка соотношения сигнал/шум. Сравнение этих алгоритмов показывает, что среди них нет существенно выделяющихся с точки зрения качества поиска участков речь/не речь [9].

В [1] описываются и сравниваются основные подходы к выделению речевой активности для протокола VoIP, в частности, приводятся такие оценки работы алгоритмов, как доля неверно классифицированных кадров и величина сжатия.



Рис. 1. Схема работы системы верификации диктора по голосу с использованием детектора речевой активности

Наиболее подробное описание различных методов VAD, с точки зрения систем распознавания речи, приводится в статье [3]. Сравниваются алгоритмы G.729, алгоритм на основе огибающей долговременного спектра (англ. long term spectral envelope, LTSE), опирающийся на вычисление статистик дивергенции долговременного спектра (англ. long term spectral divergence, LTSD), алгоритм на основе порядковых фильтров (англ. order statistic filter, OSF), алгоритм, основанный на статистической модели (англ. Likelihood ratio test, LRT), алгоритм AMR. Исследования показывают, что лучшее качество работы демонстрирует алгоритм LTSE.

В [5] приводится сравнение алгоритма VAD на основе определения частоты основного тона (ОТ) с использованием оценок автокорреляции, алгоритма спектральной энергии и алгоритма LTSE. Результаты экспериментов на нескольких типах данных показывают, что применение метода на основе вычисления оценки спектральной энергии дает, в целом, лучшее качество системы распознавания диктора.

Таким образом, учитывая результаты исследований известных алгоритмов VAD, представленных в литературе (как самих по себе, так и с точки зрения оценки их влияния на качество верификации), можно предположить, что алгоритм на основе оценки спектральной энергии позволяет снизить величину ошибки системы распознавания по голосу существенно, чем другие методы. В [5] также показано, что в системах верификации этот подход демонстрирует лучшие результаты, чем подход, основанный на выделении основного тона. Тем не менее, в данной работе анализируется возможность повышения качества распознавания диктора по голосу за счет использования улучшенного алгоритма VAD, построенного на поиске вокализованных участков речи. Для сравнения приводятся результаты работы системы с алгоритмом VAD на основе оценки спектральной энергии.

Алгоритм на основе оценки энергии сигнала. Рассматривается алгоритм, основанный на оценке уровня энергии, состоящий в вычислении отношения средней мощности сигнала на речевом сигнале и последующем выставлении порога мощности, по которому принимается решение о наличии речи на данном участке сигнала [1].

Простая схема алгоритма состоит в вычислении логарифма среднеквадратического отклонения на каждом кадре:

$$S_i = 20 \log \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^M (x_j^i - \bar{x}^i)^2}, \quad (2)$$

где x_j^i – j -е значение на кадре i ; \bar{x}^i – среднее значение на кадре.

Для удаления возможных помех, не лежащих в речевом диапазоне частот (например, сетевых помех на частоте 50–60 Гц), используется фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, подавляющий низкие частоты сигнала. Такой фильтр, рассчитанный методом Чебышева, обеспечивает минимальные искажения сигнала по амплитуде и по групповой задержке в области пропускания, очищая речевой сигнал от сетевых помех.

Мощность в каждом сегменте сигнала сравнивается с порогом, величина которого выставляется в 5 % от средней мощности сигнала по всей фонограмме. Превышение мощности сигнала в сегменте величины порога позволяет классифицировать его как речевой сегмент.

Алгоритм выделения вокализованных участков речи. Основная идея выделения вокализованных участков речи основана на том, что методы, применяемые экспертами в области голосовой биометрии, используют гласные и назализованные согласные. Негативной стороной является потеря некоторых согласных. Однако взрывные согласные и аффрикаты обладают меньшей идентификационной значимостью, поэтому можно предположить, что потеря некоторой части незначимого речевого материала будет компенсироваться качественным удалением неречевых участков. Это позволит, например, снизить зависимость качества распознавания от искажений канала в паузах. В основе представленного выделителя речи лежит спектральный анализ речевого сигнала. На каждом кадре спектрограммы производится поиск положений максимумов, соответствующих гармоникам основного тона (ОТ), по которым оценивается значение частоты ОТ. При этом в сигнале возможно отсутствие нижних гармоник ОТ, что характерно для телефонного канала с полосой частот 300–3400 Гц. Ниже приводится пошаговое описание алгоритма.

Шаг 1. Вычисление спектрограммы по каждому фрагменту сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье и взвешивающего окна Хана, построение гистограмм энергий в каждой спектральной полосе и суммарной гистограммы по всем спектральным полосам в полезном диапазоне частот 180–3500 Гц.

Шаг 2. Оценка по полученным гистограммам порогов отношения мощностей сигнал/шум, общего по всему спектру сигнала и отдельно в каждой спектральной полосе, а также оценка полезного диапазона частот.

Шаг 3. Усреднение спектра по частотным полосам прямоугольным окном с шириной, равной значению ОТ на предыдущем кадре, нормировка исходного спектра на усредненный с целью усиления гармоник ОТ.

Шаг 4. Оценка положения и качества (выраженности) спектральных максимумов, вычисление значения ОТ по положению максимумов.

Шаг 5. Пункты 3, 4 выполняются в обратном направлении по речевому сигналу (спектрограмме).

Шаг 6. Из двух полученных кривых строится одна, таким образом, чтобы она, по возможности, сохраняла непрерывность, кроме того, на этом же этапе отбрасываются ложные значения частоты ОТ.

Работа выделителя речи проверяется наложением полученных кривых ОТ на кепстр и спектрограмму (см. рис. 2). В приведенном примере частота ОТ определяется точно, несмотря на отсутствие в большей части сигнала первой гармоники.

Таким образом, можно обозначить преимущества использования детектора речи на основе анализа частоты ОТ:

выделение речевого сигнала происходит, в т. ч., на относительно зашумленных участках (соотношение сигнал/шум до 10 дБ),

непрерывность значения основного тона и принадлежность его области диапазону частот, типичных для речи.

В качестве речевых участков, как упоминалось выше, используются только вокализованные звуки, шипящие согласные отбрасываются.

Тестирование качества работы детекторов речи

При сравнении алгоритмов детектирования речевой активности критерием качества служит

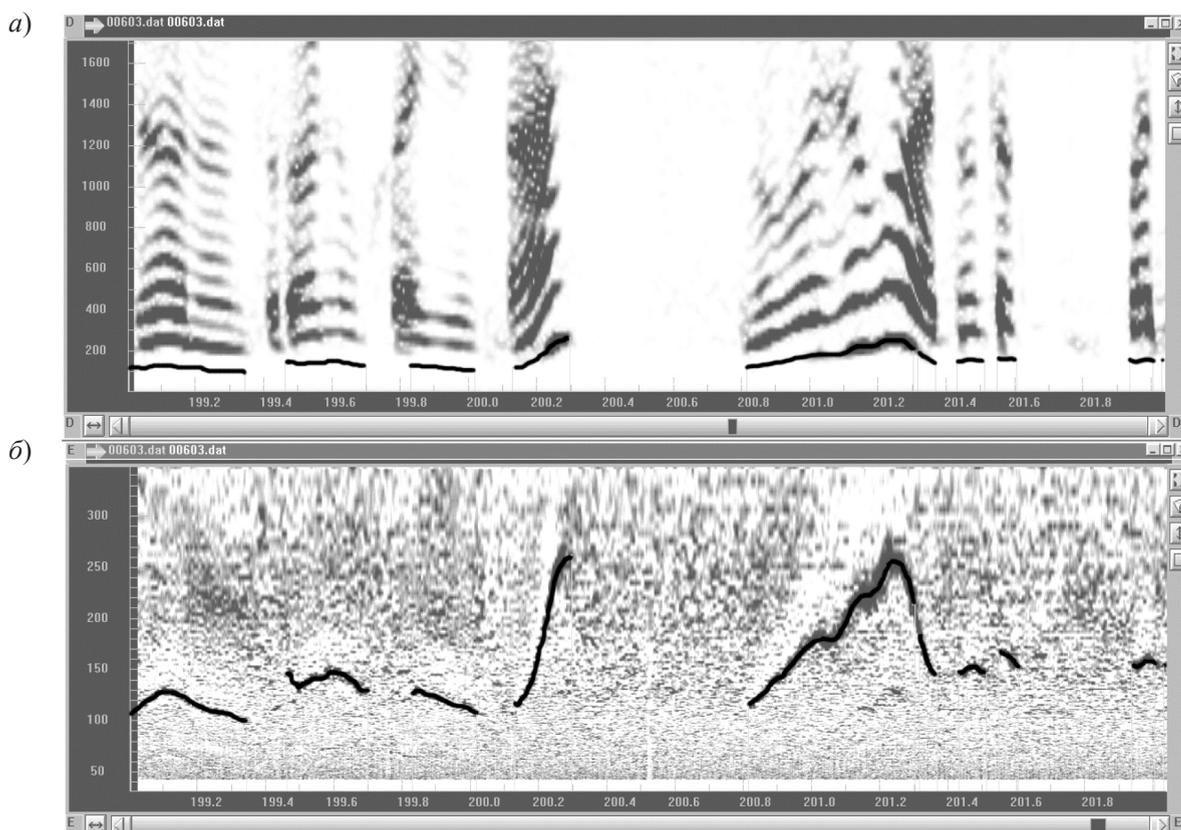


Рис. 2. Наложение кривой ОТ на спектрограмму и кепстр:
a – кривая ОТ наложена на спектрограмму; *б* – на кепстр
 по горизонтальной оси – t , с; по вертикальной – частота, Гц

ошибка EER системы верификации, включающей речевой детектор. Оценка ошибки непосредственно детектирования речевых участков на фонограмме выходит за рамки данной работы, и потому не производится.

Тестирование системы верификации проводится на речевой базе NIST 2004 общим объемом 918 фонограмм. База содержит фонограммы дикторов-мужчин, записанные в различных телефонных каналах с использованием различных микрофонов (обычный сотовый телефон, аналоговый телефон, цифровой телефон, гарнитура, громкая связь и пр.). Соотношение сигнал/шум записей варьируется в диапазоне 10–30 дБ. Исследуемая система является тексто- и языконезависимой, поэтому тестирование выполняется на фонограммах, содержащих речь дикторов на английском, русском и китайском языках. Для проведения экспериментов конфигурация и настройки всех модулей системы фиксированы, варьируются только параметры детектора речи.

Уровень ошибки EER системы с энергетическим детектором речи составил 12,1 %. В таблице приведена зависимость EER от параметров детектора речи на основе выделителя ОТ.

Очевидно, что VAD на основе выделителя основного тона обеспечивает меньшую величину EER, что обусловлено двумя причинами.

Во-первых, рассматриваемая система верификации по голосу, использующая в качестве информационных акустических признаков мелкепестральные коэффициенты, чувствительна, в первую очередь, к ошибке ложного детектирования шума как речи. Детектор на основе выделителя ОТ предъявляет более жесткие требования к частотной характеристике сигнала, исключая тем самым помехи большой амплитуды, не являющиеся речью.

Во-вторых, при автоматической верификации по голосу, так же как и при экспертной, более

Влияние параметров детектора речи на качество системы верификации (значение EER, %)

Смещение окна анализа, мс	Ограничения на изменение ОТ в пределах сегмента речи, %	
	Есть	Нет
3	5,6	6,0
6	5,8	6,0
12	6,1	6,9

информативными оказываются вокализованные участки речи.

В статье предлагается модификация алгоритма детектирования речевой активности на основе выделения основного тона. Разработан и протестирован алгоритм VAD с использованием информации о статистиках основного тона, проведено сравнение влияния выбора алгоритма VAD на качество работы системы тексто- и языконезависимой системы верификации диктора по голосу.

Определено, что выбор детектора речевой активности существенно влияет на результаты работы системы распознавания диктора по голосу. Исследование качества верификации показывает, что наименьшую ошибку в данном случае обеспечивает использование детектора речевой активности на основе выделителя ОТ.

Однако стоит заметить, что не существует алгоритма VAD, решающего наилучшим образом различные задачи. Например, в задаче определения границ речевых участков предложенный алгоритм не будет иметь такого преимущества, как в задаче распознавания диктора по голосу.

Дальнейшее направление исследований – изучение поведения разработанного алгоритма в различных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Prasad, R.** Comparison of Voice Activity Detection Algorithms for VoIP [Текст]/R. Prasad [et al.]/In proc. 7th IEEE symp. on Computers and Communications (ISCC'02).–2002.–P. 530.

2. **Gorriz, J.M.** Bispectra Analysis-Based VAD for Robust Speech Recognition. [Текст]/J.M. Gorriz [et al.]/Lecture Notes in Computer Science.–Springer, 2005.–P. 567–576.

3. **Ramírez, J.** Voice Activity Detection. Fundamentals and Speech Recognition System Robustness. [Текст]/J. Ramírez [et al.]/Robust Speech Recognition and Understanding.–I-Tech Education and Publishing, Austria, 2007.–P. 1–22.

4. **Hernandez, G.** Noise Robust Voice Detector for Speaker Recognition [Текст]/G. Hernandez [et al.]/In Proc. 19th International conf. on Pattern Recognition, IEEE.–2008.–P 1–4.

5. **Hautamaki, V.** Improving Speaker Verification by Periodicity Based Voice Activity Detection [Текст]/V. Hautamaki [et al.]// In Proc. 12th International conf. on Speech and Computer. –M., 2007.–Vol. 2. –P. 645–650.

6. **Sohn, J.** A statistical model-based voice activity detection. [Текст]/J. Sohn, N.S. Kim, W. Sung//IEEE Signal Proc. Lett.–1999.–№ 6.–P. 1–3.

7. **Labutin, P.** Speaker identification based on the statistical analysis of f0 [Текст]/P. Labutin, S. Koval, A. Raev//In Proc. IAFPA. –2007, Plymouth, UK.

8. **Капустин, А.И.** Система верификации дикторов по голосу на основе использования СГР-SVM подхода

[Текст]/А.И. Капустин, К.К. Симончик//Тр. XII Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2010).–М.–Т. 2.–С. 207–210.

9. **Beritelli, F.** Performance Evaluation and Comparison of G.729/AMR/Fuzzy Voice Activity Detectors. [Текст]/F. Beritelli [et al.]//IEEE Signal Proc. Lett.–2002.–Vol. 9.–№ 3.

10. Tuononen M., Hautamäki R. G., Fränti P. Automatic voice activity detection in different speech applications [Текст]/M. Tuononen, R.G. Hautamäki, P. Fränti//In Proc. 1st international conf. on Forensic Applications and Techniques in Telecommunications, Information, and Multimedia Workshop.–2008.–P. 1–6.

УДК 658.310.11:681.3.06

Л.И. Гололобов

МОДЕЛИ СОВМЕСТИМОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК» И «ТЕХНИКА»

Исследование и разработка автоматизированных систем управления (АСУ) основывается на эргономическом и техническом подходах, дополняющих друг друга и направленных на решение одной и той же проблемы обработки и передачи данных. Эргономический связан с изучением работы человека на технике и созданием оптимальных условий деятельности [1–3], технический исследует функционирование техники с учетом требований обеспечения деятельности, где на передний план выступают проблемы производительности технических средств [4, 5].

Математические модели, разработанные в рамках каждой теории, воспроизводят сложные процессы деятельности и функционирования техники в определенном диапазоне условий, требований и локальных критериев. Причем одна группа фактов объясняется одной теорией, а другая – другой. Необходимо отметить, что подход, основанный на выделении подсистем «человек» и «техника», усиливает стремление проигнорировать факты одной теории в рамках другой и приводит к недостаточной проработке математических моделей подсистем «человек» и «техника». Это порождает многочисленные и трудноразрешимые проблемы совместимости математических методов исследования этих подсистем. В то же время деятельность человека и функциониро-

вание техники в АСУ настолько взаимосвязаны, что их моделирование отдельно на уровне указанных подсистем не позволяет в полной мере исследовать деятельность операторов и функционирование техники в совместной обработке и передаче данных как целостный процесс, выявить его закономерность и свойства.

АСУ, в которой исследуется целостная технологическая среда «человек–техника», предназначена для управления объектами, функционирующими в экстремальных по времени условиях. АСУ представляет собой совокупность технических средств автоматизации и связи для обработки и передачи данных об обстановке и по функциям управления объектами, иерархической организационной структуры системы и методов управления, в которой работы должны выполняться в темпе проводимых мероприятий.

Рассматривается работа операторов на технике и функционирование техники (*объект исследования*) для установления закономерности совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами и разработки моделей совместимости (*предмет исследования*), через которые объединяются (*цель*) математические методы исследования подсистем «человек» и «техника».

Для решения поставленной задачи подсистема «человек» в АСУ представлена операторами с иерархической организацией взаимодействия и жестко регламентированными сроками исполнения. В качестве подсистемы «техника» исследуется компьютерная сеть из трех ЛВС (Ethernet, Token Ring и FDDI) с протоколами, сетевыми и информационными технологиями, характерными для Интернет. Передача данных между сетями Ethernet и Token Ring организована через сеть FDDI. Исходными данными моделей совместимости служат результаты моделирования деятельности и функционирования техники на уровне подсистем «человек» и «техника», а выходными данными становятся результаты функционирования подсистем, объединенные через модели совместимости, в процессе совместной обработки и передачи данных.

В табл. 1 приведены показатели качества и производительности обработки и передачи данных. Продуктивность имеет размерность $\frac{\text{объем данных}}{\text{время}}$, реактивность – размерность времени. Загруженность характеризуется безразмерным коэффициентом использования ресурсов подсистем «человек» и «техника» в системе «человек–техника». Коэффициент использования – отношение временных затрат подсистемы «человек» или подсистемы «техника» к суммарным временным затратам системы «человек–техника». Временные затраты зависят от объема

обрабатываемых и передаваемых данных и производительности. Объем данных зависит от размаха проводимых мероприятий. Продуктивность и загруженность ресурсов интересует администратора системы. Реактивность важна тем, кого система обслуживает.

Реактивность и загруженность являются внешними характеристиками производительности, продуктивность – внутрисистемная характеристика подсистем и системы. За критерий оценки эффективности совместной обработки и передачи данных операторами и техникой выбрана реактивность (время отклика системы «человек–техника»).

Сдерживающим фактором оценки производительности целостной системы «человек–техника», выявления закономерности и свойств совместной обработки и передачи данных операторами и техникой, разработки моделей совместимости являются проблемы нагрузки, границ, меры объема и объекта совместной обработки и передачи данных.

В [4, 5] подчеркивается, что практически не существует исследования по оценке производительности, для которого не встает вопрос о нагрузке. В [4] отмечается, что люди воздействуют на производительность системы, создавая входные сигналы (программы, данные, команды), которые обозначаются термином «рабочая нагрузка». Это определение рабочей нагрузки считалось бы неполным, если бы не были точно определены

Таблица 1

Показатели качества и производительности компонентов и системы в целом

Показатели качества	Показатели производительности	Общее определение
Продуктивность	Интенсивность обслуживания, пропускная способность	Объем информации, обрабатываемой подсистемой или системой в единицу времени
Реактивность	Время обработки, прохождения, отклика	Время между предъявлением подсистеме или системе входных данных и появлением соответствующей выходной информации
Загруженность	Коэффициент использования подсистем «человек» и «техника» системы «человек–техника»	Отношение временных затрат подсистемы «человек» или «техника» к суммарным временным затратам системы «человек–техника»

временные границы. Так, в недалеком прошлом в вычислительных центрах рабочая нагрузка определялась временем обработки данных в течение часа, дня, недели и т. д. Определялась также рабочая нагрузка за время существования вычислительной системы. При уменьшении длительности периода времени становится необходимым дальнейшее уточнение определения рабочей нагрузки, поскольку возрастает важность временных граничных условий. Поэтому в определении рабочей нагрузки появилась временная составляющая. Под рабочей нагрузкой стали понимать набор всех входных сигналов, получаемых системой от своего окружения за заданный период времени [5]. Из последнего определения следует, что нагрузка характеризуется объемом и временем.

Очевидно, что для определения рабочей нагрузки на уровне оператора и используемых им технических средств должны быть уточнены границы системы. Многие исследователи пришли к выводу о необходимости включения человека в состав вычислительной системы. Так, Д. Феррари [4] акцентирует внимание на том, что хотя среда вычислительной системы и не определяется точно в виду граничных трудностей самого понятия системы, однако она всегда включает коллектив пользователей. Для проектирования деятельности оператора Г. В. Суходольский видит необходимым описание и оценку этой деятельности как «человеческой» управляющей подсистемы в системе «человек-техника» [1]. Бринч Хансен [10] считает, что операционную систему можно определить как «набор ручных и автоматических процедур», которые позволяют эффективно использовать вычислительную установку.

Следовательно, для исследования деятельности операторов и функционирования техники как целостного процесса, границы вычислительной системы данных должны быть расширены включением в ее состав человека.

В зависимости от уровня ресурсов, на котором анализируется их производительность, используются различные меры объема. Наиболее распространенные меры объема – шаг задания, программа, процесс, сообщение, взаимодействие (обмен сообщениями), транзакция, сценарий, команда, пакет в сетях с коммутацией пакетов и т. п. В [4] отмечается, что ни одна из этих мер объема данных не обладает независимостью от самой нагрузки и системы. Эти два свойства необходимы, чтобы установить некую меру объема данных в

качестве универсальной и перейти к моделированию совместной обработки и передачи данных.

Очевидно, что каждая из перечисленных мер объема состоит из символов для оператора и байтов для технических средств, которые обрабатываются оператором и ЭВМ и передаются в сетях. Поэтому предлагается на уровне оператора и технических средств взять символ за минимальную меру объема, нагрузку, единицу информации и объект совместной обработки и передачи данных, а время обработки и передачи символов – за характеристику их функционирования. Клавиатурный, дисплейный или озвученный символ – реальная нагрузка и универсальная мера объема для оператора и (в виде байтов) для технических средств. Символы существуют в системе «человек–техника» и вне системы в виде распечатанного текста, записи на компакт-диске и т. п. Из-за дисбаланса между быстродействием оператора и производительностью технических средств за одно и то же время подсистемы «человек» и «техника» обрабатывают различные объемы данных. Для подсистемы «техника» данными являются не только символы, обрабатываемые оператором, но и программный код. Например, Web-страница передается по сети от сервера клиенту и содержит как данные для оператора, так и программный код Web-формы, на которой представлены данные.

На уровне оператора и техники обрабатываются символы, представленные графическим пространством имен, которое инкапсулирует основные графические функции. В терминах *Microsoft* эти функции известны как *GDI+* (*Graphical Device Interface*). Класс *Graphics* является фундаментальным для *GDI+*, т. к. определяет графическую поверхность, на которой отображаются обрабатываемые данные, и действует как посредник между человеком и техникой, объединяя трудовой процесс и процесс функционирования техники. Оператор в работе использует клавиатуру, экран дисплея, и мышь. На экране дисплея размещаются и используются графические символы собственно экрана (экранных форм, панели задач, панели инструментов, выпадающего меню кнопки «Пуск», главного меню), контекстного меню мыши, отображаются и редактируются алфавитно-цифровые и специальные символы клавиатуры.

Учитывая изложенное выше, установим закономерность совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами.

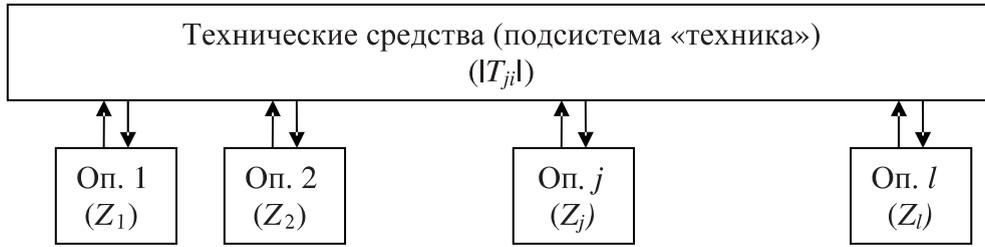


Рис. 1. Структурная схема совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами

Совместная обработка и передача данных операторами и используемыми ими техническими средствами в общем виде представлена на рис. 1.

Суммарное время T_j j -го оператора и используемых им технических средств описываются системой уравнений:

$$T_j = (T_{j1} + T_{j2} + \dots + T_{ji} + \dots + T_{jl}) + Z_j$$

или

$$T_j = \sum_{i=1}^l T_{ji} + Z_j, \quad (1)$$

где T_{ji} – элементы матрицы $|T_{ji}|$ представляют временные затраты технических средств на взаимодействие j -го с i -м оператором; $j, i = 1, 2, \dots, l$; Z_j – временные затраты j -го оператора; l – число включенных рабочих станций, число операторов меньше или равно l . Если $j = i$ и $T_{ji} = 0$, то j -й оператор не работает, но j -я рабочая станция включена. Если $j \neq i$ и $T_{ji} \neq 0$, имеет место индивидуальная работа j -го оператора. Для случая $j \neq i$ и $T_{ji} \neq 0$ j -й оператор взаимодействует с i -м оператором (групповая работа).

Введем в (1) коэффициент $a_{ji} = T_{ji}/T_i$ использования технических средств в процессе взаимодействия j -го с i -м оператором. После подстановки в (1) $T_{ji} = a_{ji}T_i$ система уравнений (1) принимает вид:

$$T_j = \sum_{i=1}^l a_{ji} T_i + Z_j. \quad (2)$$

Представим (2) в матричном виде:

$$\mathbf{T} = \mathbf{AT} + \mathbf{Z}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_j \\ \dots \\ T_l \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{ji} & \dots & a_{jl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{l1} & a_{l2} & \dots & a_{li} & \dots & a_{ll} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_j \\ \dots \\ Z_l \end{pmatrix}.$$

Если в (3) неотрицательная квадратная матрица \mathbf{A} невырожденная, то для любого положитель-

ного вектора \mathbf{Z} имеет место отношение

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Z}, \quad (4)$$

где \mathbf{A} – квадратная матрица коэффициентов использования технических средств; \mathbf{I} – единичная матрица размерности $l \times l$:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

В отношении (4) присутствуют такие показатели производительности, как время отклика \mathbf{T} системы «человек–техника», время отклика \mathbf{Z} подсистемы «человек», коэффициент использования $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ подсистемы «человек» и коэффициент использования \mathbf{A} подсистемы «техника», которые в совокупности характеризуют процесс совместной обработки и передачи данных на уровне операторов и используемых ими технических средств.

Следовательно, закономерность совместной обработки и передачи данных человеком и техническими средствами состоит в том, что реактивность \mathbf{T} системы «человек–техника» и \mathbf{Z} подсистемы «человек» связаны между собой через их загруженность, т. е. $\mathbf{T} = \mathbf{BZ}$, где $\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, \mathbf{A} – загруженность подсистемы «техника», $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ – загруженность подсистемы «человек» и \mathbf{I} – единичная матрица.

На основании (4) раскроем закономерность совместной обработки и передачи данных и определим место (2) и (3) в этом процессе. С этой целью выполним некоторые преобразования для (4). Так как для матриц $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ и $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ существует равенство $(\mathbf{I} - \mathbf{A})(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I}$, то $\mathbf{Z} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{T}$. Для $\mathbf{A} = 0$ имеем $\mathbf{T} = \mathbf{Z}$. Это значит, что все действия по обработке и передаче данных выполняет человек. Технические средства не используются. Если $\mathbf{Z} = 0$, то имеет место $(\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{T} = 0$. Так как временные затраты \mathbf{F} операторов равны нулю,

Таблица 2

Режимы совместной обработки и передачи данных

Работа оператора без технических средств автоматизации деятельности	Автоматизированный режим обработки и передачи данных	Автоматический режим обработки и передачи данных
$T_j = \sum_{i=1}^l a_{ji} T_i + Z_j,$ $T_{ji} = 0, a_{ji} = T_{ji}/T_i, a_{ji} = 0, T_j = Z_j$	$T_j = \sum_{i=1}^l a_{ji} T_i + Z_j,$ $Z_j \neq 0, T_{ji} \neq 0, a_{ji} \neq 0$	$T_j = \sum_{i=1}^l a_{ji} T_i + Z_j,$ $Z_j = 0, a_{ji} \neq 0, T_j = \sum_{i=1}^l a_{ji} T_i$
$T = AT + Z, A = 0, T = Z$	$T = AT + Z, Z \neq 0, A \neq 0$	$T = A + Z, Z = 0, A = I, T = T$

то очевидно, загруженность трудовых ресурсов $(I-A) = 0$. Это значит $A = I$ и $T = T$, что соответствует автоматическому режиму обработки и передачи данных без участия человека. Наконец, если $F \neq 0$ и $A \neq 0$, то $T = AT + Z$, т. е. выполняется автоматизированная обработка и передача данных. Таким образом, (2) и (3) охватывают ручной, автоматизированный и автоматический режимы обработки и передачи данных. Полученные результаты содержатся в табл. 2.

В моделях (1)–(4) совмещены деятельность операторов и функционирование техники в процессе обработки и передачи данных человеком и техникой, поэтому назовем их «моделями совместности».

Совмещение математических моделей подсистем «человек» и «техника» назовем «методом перехода от потока задач на решение к потоку символов на обработку и передачу».

В работе j -го оператора можно выделить информационную (содержательную) и компьютерную (манипуляторную) составляющие деятельности. Информационная деятельность оператора связана с решением следующих задач: вход в систему, ведение базы данных, формирование документов на основании информации из баз данных, получение и отправка документов и т. д. Компьютерная деятельность при решении задач сводится к действиям оператора над символами при помощи клавиатуры, экрана дисплея и манипулятора мышью.

Пусть объем данных в процессе работы j -го оператора с клавиатурой, экраном дисплея и мышью равен $N_j = ns_j + np_j + nd_j + nw_j + nr_j + m1_j + m2_j + m3_j + m4_j + m5_j$, где количество символов,

обрабатываемых оператором с помощью клавиатуры и экрана: ns_j – при входе в систему, np_j – во время работы с базой данных, nd_j – в ходе формирования документа, nw_j – на этапе отправки документа, nr_j – при получении документа; на экране дисплея манипулятором мышью: $m1_j$ – во время входа в систему, $m2_j$ – при работе с базой данных, $m3_j$ – в ходе формирования документа; $m4_j$ – в процессе передачи документа, $m5_j$ – на этапе приема документа.

Временные затраты j -го оператора на обработку s -го символа клавиатурой обозначим через $tnskly_{js}, tnpkly_{js}, tndkly_{js}, tnwkly_{js}, trnkly_{js}$, на экране через $tnsscr_{js}, tnpscr_{js}, tndscr_{js}, tnwscr_{js}, trnscr_{js}$ и манипулятором мышью через $tm1_{js}, tm2_{js}, tm3_{js}, tm4_{js}, tm5_{js}$.

Временные затраты Z_j j -го оператора на информационную деятельность состоят из времени, затраченного на вход в систему (B_j), работу с данными (U_j), формирование (G_j), передачу (W_j), получение документа (R_j) и косвенных временных затрат (H_j), не связанных с обработкой и передачей данных. Величина H_j рассматривается как среднее время согласования (координации) действий j -го с i -м оператором в иерархии взаимодействия. Например, в режиме тренировок может быть уточнение задания, определение порядка действий и т. д. В рабочих ситуациях, жестко регламентированных временем, косвенные временные затраты H_j сводятся к нулю. Будем считать $H_j = 0$.

Тогда суммарные временные затраты Z_j j -го оператора на информационную деятельность равны:

$$Z_j = B_j + U_j + G_j + W_j + R_j + H_j, \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } B_j &= tnsklv_j + tnsscr_j + tm1_j, \quad tnsklv_j = \sum_{s=1}^{ns_j} tnsklv_{js}, \\
 tnsscr_j &= \sum_{s=1}^{ns_j} tnsscr_{js}, \quad tm1_j = \sum_{s=1}^{m1_j} tm1_{js}, \\
 U_j &= tnpklv_j + tnpscr_j + tm2_j, \quad tnpklv_j = \sum_{s=1}^{np_j} tnpklv_{js}, \\
 tnpscr_j &= \sum_{s=1}^{np_j} tnpscr_{js}, \quad tm2_j = \sum_{s=1}^{m2_j} tm2_{js}, \\
 G_j &= tndklv_j + tndscr_j + tm3_j, \quad tndklv_j = \sum_{s=1}^{nd_j} tndklv_{js}, \\
 tndscr_j &= \sum_{s=1}^{nd_j} tndscr_{js}, \quad tm3_j = \sum_{s=1}^{m3_j} tm3_{js}, \\
 W_j &= tnwklv_j + tnwscr_j + tm4_j, \quad tnwklv_j = \sum_{s=1}^{nw_j} tnwklv_{js}, \\
 tnwscr_j &= \sum_{s=1}^{nw_j} tnwscr_{js}, \quad tm4_j = \sum_{s=1}^{m4_j} tm4_{js}, \\
 R_j &= trnklv_j + trnscr_j + tm5_j, \quad trnklv_j = \sum_{s=1}^{nr_j} trnklv_{js}, \\
 trnscr_j &= \sum_{s=1}^{nr_j} trnscr_{js}, \quad tm5_j = \sum_{s=1}^{m5_j} tm5_{js}; \quad H_j = 0.
 \end{aligned}$$

Так как информационная и компьютерная деятельность – две стороны одного процесса, то для определения временных затрат F_i i -го оператора на компьютерную деятельность необходимо перераспределить временные затраты компонент Z_j между компонентами F_i .

Компонентами временных затрат F_i i -го оператора на компьютерную деятельность являются временные затраты на обработку символов клавиатурой (K_i), на экране (D_i), манипулятором мышь (M_i) и косвенные временные затраты (E_i), не связанные с обработкой и передачей данных. Так же, как и для информационной составляющей временных затрат, будем считать $E_i = 0$. Тогда временные затраты i -го оператора на компьютерную деятельность равны

$$F_i = K_i + D_i + M_i + E_i, \quad (6)$$

где $K_i = tnsklv_i + tnpklv_i + tnwklv_i + trnklv_i$,

$$tnsklv_i = \sum_{s=1}^{ns_i} tnsklv_{is}, \quad tnpklv_i = \sum_{s=1}^{np_i} tnpklv_{is},$$

$$tndklv_i = \sum_{s=1}^{nd_i} tndklv_{is}, \quad tnwklv_i = \sum_{s=1}^{nw_i} tnwklv_{is},$$

$$trnklv_i = \sum_{s=1}^{nr_i} trnklv_{is};$$

$D_i = tnsscr_i + tnpscr_i + tnwscr_i + trnscr_i$,

$$tnsscr_i = \sum_{s=1}^{ns_i} tnsscr_{is}, \quad tnpscr_i = \sum_{s=1}^{np_i} tnpscr_{is},$$

$$tndscr_i = \sum_{s=1}^{nd_i} tndscr_{is}, \quad tnwscr_i = \sum_{s=1}^{nw_i} tnwscr_{is},$$

$$trnscr_i = \sum_{s=1}^{nr_i} trnscr_{is};$$

$$\begin{aligned}
 M_i &= tm1_i + tm2_i + tm3_i + tm4_i + tm5_i, \quad tm1_i = \sum_{s=1}^{m1_i} tm1_{is}, \\
 tm2_i &= \sum_{s=1}^{m2_i} tm2_{is}, \quad tm3_i = \sum_{s=1}^{m3_i} tm3_{is}, \quad tm4_i = \sum_{s=1}^{m4_i} tm4_{is}, \\
 tm5_i &= \sum_{s=1}^{m5_i} tm5_{is}. \quad E_i = 0.
 \end{aligned}$$

Из полученных математических зависимостей видно, что составляющие K_i, D_i, M_i, E_i временных затрат F_i i -го оператора на компьютерную деятельность формируются из составляющих $B_j, U_j, G_j, W_j, R_j, H_j$ временных затрат Z_j на информационную деятельность, т. е. компоненты временных затрат Z_j перераспределяются между компонентами F_i . Во взаимодействии i -го с j -м оператором временные затраты технических средств на компьютерную деятельность описываются матрицей $|T_{ij}|$, которая является результатом транспонирования матрицы $|T_{ji}|$ временных затрат на информационную деятельность. Равенство временных затрат на компьютерную и информационную деятельность назовем *свойством взаимной однозначности*.

Следовательно, модели (1)–(4) преобразуются к виду $T_i = \sum_{j=1}^l T_{ij} + F_i$, $T_i = \sum_{j=1}^l a_{ij} T_j + F_i$, $T = AT + F$ и $T = (I - A)^{-1}F$. Это преобразование является результатом перехода от потока задач на решение к потоку символов на обработку, что отражено на рис. 2.

Суммарные временные затраты T_i i -го оператора состоят из временных затрат F_i на компьютерную деятельность и временных затрат X_i , используемых им технических средств $T_i = F_i + X_i$, где $X_i = \sum_{j=1}^l T_{ij}$ и для l операторов:

$$T = \sum_{i=1}^l F_i + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l T_{ij}. \quad (7)$$

Суммарные временные затраты T_j j -го оператора состоят из временных затрат на информационную деятельность Z_j и временных затрат Y_j , используемых им технических средств $T_j = Z_j + Y_j$, где $Y_j = \sum_{i=1}^l T_{ji}$ и для l операторов:

$$T = \sum_{j=1}^l Z_j + \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l T_{ji}. \quad (8)$$

В матричной форме модель (7) записывается как $T = F + X$ или $T = K + D + M + E + X$ и модель (8) в виде $T = Z + Y$ или $T = B + U + G + W + R + H + Y$.

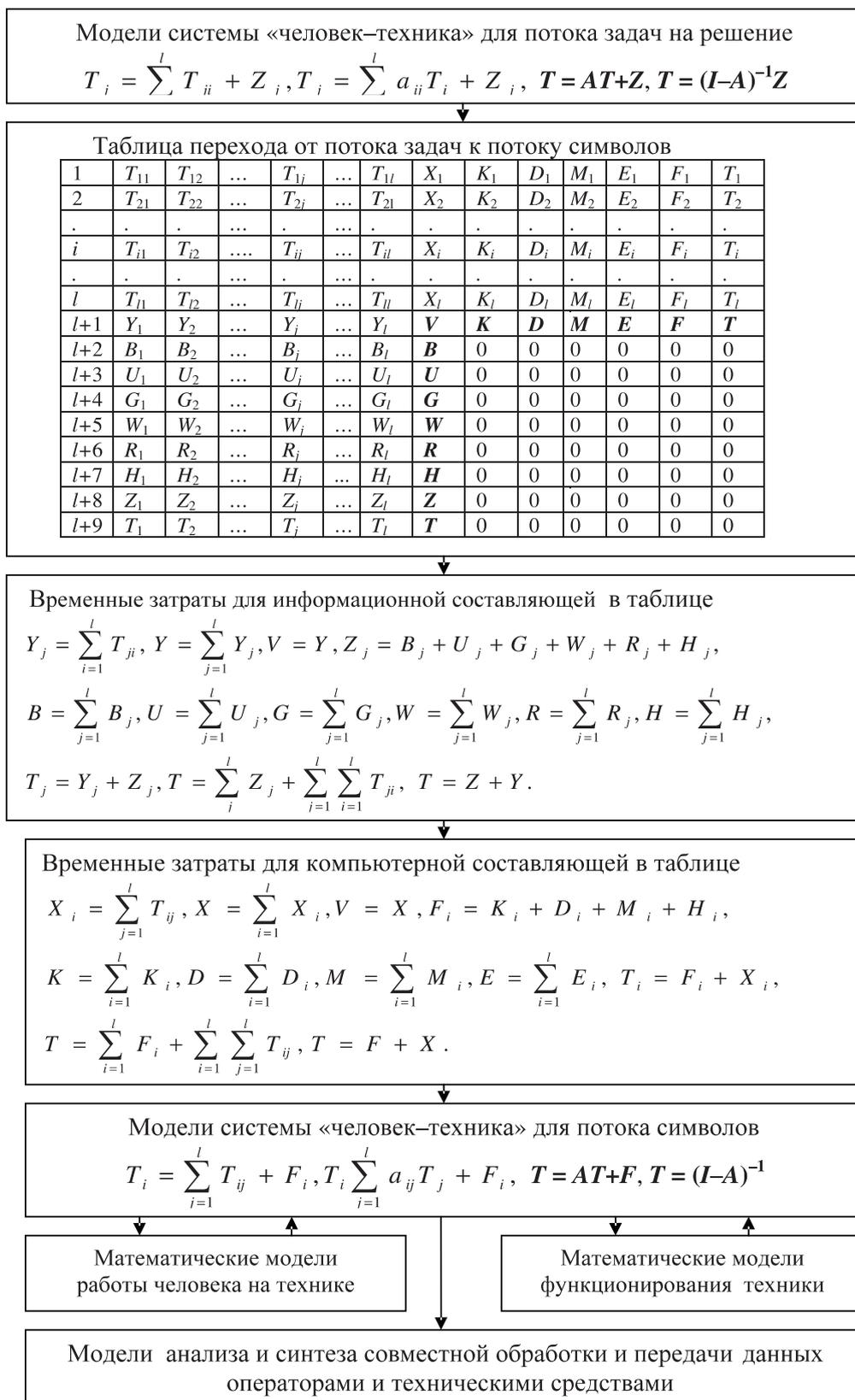


Рис. 2. Переход от потока задач на решение к потоку символов на обработку и передачу

Исходными данными для моделей совместимости (7) и (8) служат временные затраты подсистем «человек» и «техника». Погрешности исходных данных и порожденные ими погрешности конечных временных показателей, полученных на моделях подсистем «человек» и «техника», переносятся в исходные данные моделей совместимости. После их выполнения процедуры суммирования на этих моделях представляют результат совместной обработки и передачи данных на уровне системы «человек–техника». Для моделирования подсистем «человек» и «техника» существует большой набор средств моделирования систем, анализ достоинств и недостатков которых дан в [3]. Из средств моделирования работы человека на технике (подсистема «человек») широкое применение получили алгоритмическая алгебра и нелинейные регрессионные модели [2], функциональные сети [3]. Для моделирования обработки и передачи данных в компьютерных сетях (подсистема «техника») используются как аналитические [4, 6, 7], так и имитационные методы [8, 9] теории массового обслуживания. В [5] для расчета временных затрат различных категорий ресурсов (центральный процессор, диск, дисковые массивы сервера, маршрутизаторы, сеть) Web-систем, т. е. компьютерной сети с сетевыми и информационными технологиями Интернет, предлагаются аналитические модели. Для наглядного представления сложных процессов деятельности и функционирования техники и объединения их через модели совместимости, используются упрощенные аналитические модели подсистем «человек» и «техника».

Временные затраты F_i на компьютерную и Z_i на информационную деятельность (подсистема «человек») в моделях совместимости (7) и (8) вычисляются через временные затраты i -го оператора на работу с клавиатурой $tnskly_{is}$, $tnpkly_{is}$, $tndkly_{is}$, $tnwkly_{is}$, $tnrkly_{is}$, экраном $tnsscr_{is}$, $tnpscr_{is}$, $tndscr_{is}$, $tnwscr_{is}$, $tnrscr_{is}$ и манипулятором мышь $tm1_{is}$, $tm2_{is}$, $tm3_{is}$, $tm4_{is}$, $tm5_{is}$. Исходными данными для вычисления временных затрат на работу с клавиатурой, экраном и мышью служит время обработки s -го символа i -м оператором. Для моделирования обработки s -го символа i -м оператором вводится обобщенная рабочая операция A_s обработки s -го символа и используется аппарат функциональных сетей, вероятностно-временные зависимости описания действий оператора в рабочих, контрольных и диагностических опера-

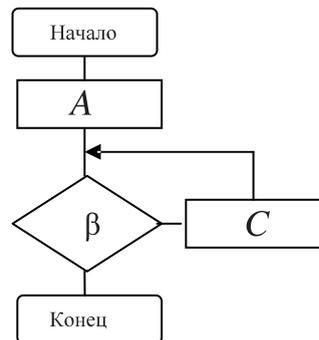


Рис. 3. Алгоритм \mathfrak{R} выполнения технологической операции A_{is}

циях и нелинейные регрессионные зависимости [2, 3]. Вероятностно-временные модели на функциональных сетях с нелинейными регрессионными зависимостями моделирования трудовых операций сочетают в себе возможности описания функционирования, оценки быстродействия и безошибочности с учетом вработываемости, утомляемости и других факторов.

Оператор, работая с символами, обрабатывает каждый из них: вводит, контролирует и, при появлении ошибки, устраняет ее. Алгоритм \mathfrak{R} действий оператора над символом в технологической операции A_{is} показан на рис. 3.

В алгоритме \mathfrak{R} технологическая операция A_{is} обработки i -м оператором s -го символа представлена в виде блок-схемы: работа – визуальный контроль – доработка.

Средствами алгоритмической алгебры технологическая операция A_{is} описывается функциональной сетью:

$$A_{is} = A_{\beta}(\Psi \cup C)\Pi, \quad (9)$$

где A – рабочая функциональная единица обработки символа; β – условие (функциональная единица контроля), проверяемое при контроле результата выполнения рабочей функциональной единицы A ($\beta = 1$, если A выполнена без ошибки, и $\beta = 0$, если A выполнена с ошибкой); Ψ – функциональная единица, интерпретируемая как фиксация на экране дисплея результата выполнения рабочей функциональной единицы A ; C – функциональная единица доработки, выполняемая при устранении ошибки, обнаруженной при контроле β ; Π – функциональная единица, интерпретирующая передачу символа.

Входящие в (9) элементарные действия моделируются функциональными сетями:

$$A=(A_s)^N, C=(A_s)^{0N}, \Pi=A_s, \quad (10)$$

где A_s – обобщенная операция взаимодействия оператора с клавиатурой, экраном и мышью при обработке s -го символа; N_i – число символов, обрабатываемых i -м оператором; θ – безразмерный коэффициент, характеризующий долю перенаблюдаемых оператором символов при обработке данных объема N_i .

При переходе от алгоритмических формул (9) и (10) к их вероятностно-временным эквивалентам имеют место следующие зависимости [2]:

$$\begin{aligned} P_{A_{is}}^1 &= [P_A^1 K_\beta^{11} + (P_A^1 K_\beta^{10} + P_A^0 K_\beta^{00}) P_C^1] P_D^1; \\ T_{A_{is}} &= T_A + T_K + (P_A^1 K_\beta^{10} + P_A^0 K_\beta^{00}) T_C] P_D^1; \\ P_A^1 &= (P_s)^{N_i}; P_A^0 = 1 - P_A^1; T_A = N_i T_s; T_K = N_i T_\beta; \\ P_C^1 &= (P_s)^{0N_i}; T_C = \theta N_i T_s; P_D^1 = P_s; T_D = T_s, \end{aligned} \quad (11)$$

где $P_{A_{is}}^1$ – вероятность и $T_{A_{is}}$ – математическое ожидание времени безошибочного выполнения технологической операции A_{is} ; P_s – вероятность и T_s – математическое ожидание времени безошибочного выполнения операции A_s , $s = 1, 2, \dots, N_i$; T_k – среднее время визуального контроля; K_β^{11} (K_β^{10}) – вероятность отсутствия (наличия) ошибок при визуальном контроле N_i обрабатываемых символов, $K_\beta^{11} + K_\beta^{10} = 1$; K_β^{00} (K_β^{01}) – вероятность наличия (отсутствия) ошибок при визуальном контроле N_i обрабатываемых символов, $K_\beta^{00} + K_\beta^{01} = 1$.

Для учета факторов, влияющих на безошибочность и быстродействие оператора при выполнении алгоритма \mathcal{R} над символом, используем регрессионные модели. Наиболее удобны нелинейные регрессионные модели, которые в отличие от традиционных полиномиальных моделей допускают содержательную интерпретацию параметров. В вычислениях P_s и T_s обобщенной операции A_s для (11) используются нелинейные регрессионные модели в виде пары взаимосвязанных зависимостей [2]:

$$\begin{aligned} P_s &= \{1 - [e^{-q_1 x_1} + (q_2 - e^{-q_1 x_1}) \times \\ &\quad \times e^{-q_3 (x_2 - x_3)}]\} \times e^{-q_4 (x_4 - x_5)}; \\ T_s &= (a_0 + a_2 e^{-a_1 x_1}) [1 + e^{-q_3 (x_2 - x_3)} (a_3 - 1)] + \\ &\quad + a_4 e^{-a_5 x_4} + (e^{-a_6 x_4} - 1) - a_7, \end{aligned}$$

где x_1 – квалификация оператора; $(x_2 - x_3)$ – дефицит времени, оцениваемый разностью предельно допустимого (x_2) и фактически затрачиваемого (x_3) времени на выполнение элементарной операции; x_4 – продолжительность работы оператора; a_0 –

математическое ожидание времени выполнения операции A_s неутомленным оператором высшей квалификации, т. е. высший достижимый уровень быстродействия оператора; a_2, a_4 – максимальные добавки к затратам времени на выполнение операции при необученности и вработываемости соответственно; a_3 – коэффициент изменения времени выполнения операции в условиях наибольшей операционной напряженности; a_1, a_5, a_6 – параметры, характеризующие скорость изменения времени выполнения операции из-за необученности, вработываемости и утомляемости соответственно; a_7 – параметр, имеющий размерность времени и обеспечивающий выход на стационарный режим, характеризующий быстродействие оператора от продолжительности его безошибочной работы; q_1, q_3, q_4 – параметры, характеризующие скорость изменения безошибочности оператора в зависимости от роста квалификации x_1 , отклонения времени ($x_2 - x_3$) и продолжительности работы x_4 ; q_2 – вероятность совершения ошибки при наибольшей операционной напряженности; q_5 – параметр, имеющий ту же размерность, что и x_4 , и по физическому смыслу соответствующий моменту наибольшей безошибочности оператора.

Исходными данными для вычисления временных затрат T_{ij} (T_{ji}) технических средств (подсистема «техника») в моделях совместимости (7) и (8) являются временные задержки в компьютерной сети. Для вычисления временных затрат используется аналитическая модель функционирования компьютерной сети с Web-технологией из [1]. В аналитической модели определены объемы передаваемых данных и раскрыт физический смысл передачи. Время T_{ij} состоит из времени t_{cpu}^{ij} использования центрального процессора и t_d^{ij} работы диска сервера, времени t_{net}^{ij} передачи данных по сетям и времени t_r^{ij} , затраченного на определение маршрута движения дейтаграмм. Сообщение в сети от клиента к серверу обычно проходит стек протоколов и передается через одну или большее количество сетей. Протокольные объекты каждого уровня общаются между собой за счет обмена протокольными единицами обмена (*Protocol Data Unit, PDU*), состоящими из заголовка и области данных. В *PDU* обычно отводится максимально возможный размер под область данных. Максимальный размер области данных в байтах носит название *максимального передаваемого блока (maximum transmission unit, MTU)*. Маршрутизаторы фрагментируют дейтаграммы при переходе к

сети с более низким значением MTU . Фрагменты собираются заново на уровне *Internet*-протокола IP на хосте места назначения. Каждый уровень протокола к данным добавляет свой собственный заголовок, а иногда и «хвост», т. е. заключительную часть.

Время процессора равно $t_{ij}^{cpu} = \alpha_{cpu_{kl}} / U_{cpu_{kl}}$ где $\alpha_{cpu_{kl}}$ – коэффициент использования и $U_{cpu_{kl}}$ – быстродействие процессора по классу запросов kl , $kl=1, 2, 3$ (rf – размер файла, $1 - rf \leq 20$ Кб, $2 - 20$ Кб $< rf \leq 1$ Мб, $3 - rf > 1$ Мб). Время обслуживания для диска составляет

$$t_{ij}^d = t_{pd} + t_{zd} + \frac{N_i^{bd} \times R_{bd}}{V_d}, \text{ где } t_{pd} - \text{среднее время поиска на диске; } t_{zd} - \text{средняя задержка; } N_i^{bd} - \text{количество считываемых с диска блоков; } R_{bd} - \text{размер блока (в байтах); } V_d - \text{скорость считывания с диска.}$$

Временные затраты сети t_{ij}^{net} состоят из времени t_{ij}^c затраченного сетью на запрос клиента к серверу, и времени на ответ сервера t_{ij}^s : $t_{ij}^{net} = t_{ij}^c + t_{ij}^s$. Запрос от i -го клиента к серверу размещается в области данных TCP -сегмента, который поступает в область данных IP -дейтаграммы. Дейтаграмма инкапсулируется кадрами *Ethernet*, *FDDI* и *Token Ring* по мере ее продвижения по сетям. Таким образом, по мере перехода от одной сети к другой N_{client_i} -байтовый клиентский запрос преобразуется в N_{cip} -байтовый кадр p -й сети: $N_{cip} = N_{client_i} + R_{TCP} + R_{IP} + R_{kadr_p}$, где R_{TCP} , R_{IP} и R_{kadr_p} – размеры заголовков (служебной информации) протоколов TCP , IP и p -й сети. Время на передачу запроса от i -го клиента по p -й сети равно $t_{cip} = \frac{N_{cip} \times 8}{10^6 \times V_p}$, V_p – пропускная способность p -й сети, $\frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$. Тогда временные затраты на запрос клиента равны $t_{ij}^c = \sum_{p=1}^P t_{cip}$, $p = 1, 2, \dots, P$, P – общее количество сетей, через которые проходит запрос. Определим временные затраты t_{ij}^s на ответ сервера i -му клиенту. Чтобы после появления TCP -соединения исключить фрагментирование данных, между сервером и клиентом, устанавливается максимальный размер сегмента MSS в байтах, меньшим или равным MTU для всех сетей, т. е. $MSS \leq \min_{p=1}^P MTU - R_{TCP} - R_{IP}$, MTU , как отмечалось, максимальный размер области данных в сетевых протоколах. Установив для N_{server_i} -байтового ответа сегмент из $N_{segment_i}$ байт, серверу требуется K_{TCP_i} сегментов, чтобы по сетям пере-

дать i -му клиенту N_{server_i} -байтовый ответ. Тогда время t_{sip} на передачу данных с учетом служебной информации равно

$$t_{sip} = \frac{[K_{TCP_i} \times (N_{segment_i} + R_{sl_p}) + (N_{dop_i} + R_{sl_p})] \times 8}{10^6 \times V_p},$$

где $R_{sl_p} = R_{TCP} + R_{IP} + R_{radar_p}$, $N_{dop} = N_{server_p} - K_{TCP_i} \times N_{segment_i}$. Время ответа $t_{ij}^s = \sum_{p=1}^P t_{sip}$.

Общее время обработки сообщения на M_r маршрутизаторах равно $t_{ij}^r = \sum_{m=1}^{M_r} t_{ir_m}$, где $t_{ir_m} = K_{id} \times Z_{r_m}$, K_{id} – количество дейтаграмм, Z_{r_m} – задержка маршрутизатора (в мкс/пакет), задержка указывается производителем.

Итак, временные затраты технических средств равны $T_{ij} = t_{cpu}^{ij} + t_d^{ij} + t_{net}^{ij} + t_r^{ij}$. Значения F_i и T_{ij} определены для $T = \sum_{i=1}^l F_i + \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l T_{ij}$. Аналогично находят Z_j и T_{ji} для $T = \sum_{j=1}^l V_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l T_{ji}$.

Свойство совместимости показывает, что законы функционирования подсистем «человек» и «техника» не противоречат установленной закономерности, трансформируются и проявляются в системе «человек–техника» через параметры совместной обработки и передачи данных.

Модели (3) и (4) получены без ограничения на сроки S исполнения работ и описывают устойчивый процесс совместной обработки и передачи данных, подразумевая под этим время S окончания работ совпадающим с суммарными временными затратами T операторов и технических средств, т. е. $Q = T - S$, $Q = 0$. Но в реальных условиях у операторов имеют место различные по времени исходы работ, т. е. как $Q = 0$, так и $Q \neq 0$. Для учета сроков исполнения работ соотношение $T = AT + F$, взаимнооднозначные $T = AT + Z$, представим в виде

$$T^* = AT^* + F^{*R} + F^{*E} - Q, \quad (12)$$

где * указывает, что имеет место общий случай ($Q \neq 0$), $F^* = F^{*R} + F^{*E}$; F^{*R} – временные затраты операторов в работе на технике, F^{*E} – косвенные временные затраты. Чтобы матричное уравнение (12), как и уравнение (3), соответствовало устойчивому процессу совместной обработки и передачи данных, временные затраты в (12) должны быть сбалансированы. Это значит, что в (12) $Q < 0$ (избыток времени) при $T^* < S$ и $Q > 0$ (не-



достаток, дефицит времени), если $T^* > S$, что отражает физический смысл процесса.

Тогда $(T = AT + F)$ принимает вид $T^* = AT^* + F^{*R} + F^{*E} - M(AT^* + F^{*R})$. После преобразований

$$T^* = (I - (I - M)A)^{-1} ((I - M)F^{*R} + F^{*E}), \quad (13)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & m_l \end{pmatrix}$$

и m_i – доля временных затрат $T_i - S_i$ i -го оператора по отношению к суммарным временным затратам операторов и технических средств на обработку

и передачу данных:

$$m_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^l T_{ij}^* + F_i^{*R}}$$

Анализ совместной обработки и передачи данных проводится на модели (12) для выявления узких мест производительности, синтез – на (13) по схеме $M \rightarrow 0$, $T^* = (I - (I - M)A)^{-1} ((I - M)F^{*R} + F^{*E}) \rightarrow T = (I - A)^{-1} F$ и $Q = 0$.

На основе предлагаемых технологических решений в виде моделей совместимости предоставляется возможность комплексного решения проблем в области инженерной психологии, эргономики, сетевых и информационных технологий как на уровне подсистем «человек» и «техника» в общем цикле функционирования системы, так и на уровне системы «человек–техника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суходольский, Г.В.** Структурно-алгоритмический анализ и синтез деятельности. [Текст]/Г.В. Суходольский. –Л.: ЛГУ, 1976. 120 с.
2. **Ротштейн, А.П.** Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий [Текст]/А.П. Ротштейн, П.Д. Кузнецов. –К.: Техника, 1992.– 180 с.
3. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания; справочник [Текст]/А.Н. Адаменко, А.Т. Ашероф, И.Л. Бердников [и др.]; под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Евграфова.–М.: Машиностроение, 1993.–528 с.
4. **Феррари, Д.** Оценка производительности вычислительных систем [Текст]/ Д. Феррари; пер. с англ. А.И. Горлина, Ю.Б. Котова и Л.В. Ухова; под ред. В.В. Мартынюка.–М.: Мир, 1981. 576 с.
5. **Менаске, Д.** Производительность Web-служб. Анализ, оценка и планирование. [Текст]/Д. Менаске, В. Алмейда; пер. с англ.–СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2003.–480 с.
6. **Вишневский, В.М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей [Текст]/ В.М. Вишневский.–М.: Техносфера, 2003.–512 с.
7. **Жожикашвили, В.А.** Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ [Текст]/ В.А. Жожикашвили, В.М. Вишневский. –М.: Радио и связь, 1988.–192 с.
8. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем [Текст]/Н.П. Бусленко. –М.: Наука, 1975.
9. **Майоров, С.А.** Основы теории вычислительных систем. учеб. пособ/ [Текст]/С.А. Майоров, Г.И. Новиков [и др.]; под ред. С.А. Майорова. –М.: Высш. шк., 1978.–408 с.
10. **Brinch, Hansen P.** Operating System Principles. [Текст]/Hansen P. Brinch. –Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1973.

УДК 621.39

И.А. Кулешов, Ю.А. Малахов, М.А. Дуплинский

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ КАНАЛА УТЕЧКИ НАРУШИТЕЛЯ

За последнее время в теории и практике весьма актуальными стали проблемы съема инфор-

мации с различных абонентских линий связи. В статье рассматривается процесс преобразования

открытых каналов между участниками информационного обмена в канал с ошибками. При этом необходимым условием является то, что канал утечки между участниками информационного обмена используется с меньшей вероятностью ошибки, чем канал, используемый нарушителем.

Постановка задачи

Необходимо передать информацию между легальными пользователями А и В, осуществляя обмен данными между ними по каналам, доступным нарушителю Е. Требуется обеспечить передачу информации с высокой надежностью для легальных пользователей и обеспечить наперед заданный низкий уровень знаний об информации для Е. Нарушитель предполагается пассивным, т. е. он может только контролировать информацию, но не создавать ее [1].

Представлен следующий сценарий (см. рис.): пользователь А передает случайную исходную последовательность X длиной N символов пользователю В, который принимает ее как последовательность Y , по дискретному симметричному каналу (ДСК) с вероятностью ошибки p_m , назовем этот канал «основным». Нарушитель Е по каналу утечки (независимому от основного канала) (ДСК с вероятностью ошибки p_w) получает последовательность Z . От В к А и от А к В имеются бесшумные каналы (БК), которые контролируются Е. С помощью этих каналов А и В добиваются устранения ошибок в основном канале, т. е. добиваются тождественности X и Y .

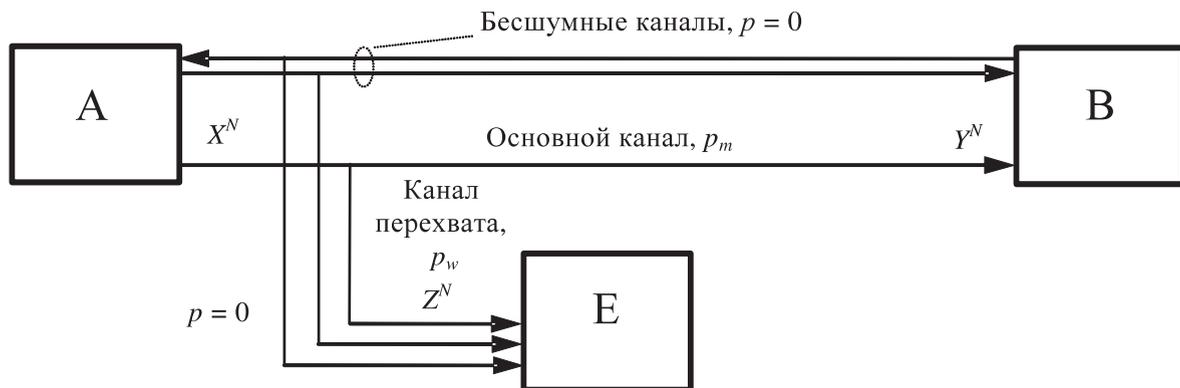
Формирование каналов на основе использования открытого канала связи, основано на трех основных принципах, которые взаимоувязаны между собой и основываются на решении определенных задач.

Первый принцип – создание условий, при которых из основного канала и канала утечки независимо от качества приема в канале утечки по сравнению с основным каналом создаются условия, при которых основной канал имеет лучшее качество приема сигналов, чем канал утечки.

Суть его заключается в получении начальных данных легальных пользователей А и В, которые коррелированы с начальными данными нарушителя (т. к. он получает по своему каналу утечки версию начальных данных) таким образом, чтобы каждый бит начальных данных легальных пользователей А и В совпадал с большей вероятностью, чем соответствующий бит начальных данных нарушителя. Это может быть реализовано с помощью простейших протоколов, которые рассмотрены ниже.

Второй принцип – обеспечение высокой достоверности принятых начальных данных легальных пользователей.

Использовать первоначальные начальные данные легальных пользователей после решения задач первого принципа нельзя, т. к. они могут различаться с большой вероятностью. Выполнение второго принципа означает исправление ошибок в «виртуальном» основном канале в принятой В последовательности Y^N и получение последовательности \tilde{Y} с вероятностью ошибки не более заданной. Исправление несовпадающих ошибок достигается передачей от В дополнительной информации. Предполагается, что нарушитель получает дополнительную информацию по своему каналу утечки и использует эту информацию для устранения ошибок. Исправления ошибок может



Сценарий процесса передачи информации

быть реализовано на основе помехоустойчивого кодирования [2–4].

Использование простейших протоколов предназначено для создания условий, при которых из основного канала и канала утечки при $p_m > p_w$ создаются «виртуальные» основной канал и канал утечки, для которых $\tilde{p}_m < \tilde{p}_w$. Протокол – это последовательность действий, предпринимаемых двумя сторонами для достижения поставленной цели. Эффективность простейших протоколов характеризуется скоростью R , равной отношению конечной длины полученной последовательности D в двоичных символах к длине N последовательности X , переданной от А к В по основному каналу, т. е.

$$R = \frac{D}{N}. \quad (1)$$

При определении R не учитываются длины последовательностей, передаваемых по БК.

Исследование протоколов

В [5–7] описаны три протокола.

Протокол с передачей случайной последовательности. А генерирует случайную последовательность λ длиной N бит, которая передается от А к В по основному каналу с вероятностью ошибки p_m . В принимает ψ , $\psi = \lambda \oplus e_m$, где e_m – образец ошибок в основном канале. В генерирует последовательность X длиной N бит, которую необходимо передать к А. В суммирует поразрядно ψ с последовательностью X и получает $Y = \psi \oplus X$, которую передает по каналу без помех обратно к А. Легальный пользователь А принимает Y и суммирует его с λ , т. е. $Y \oplus \lambda = \psi \oplus X \oplus \lambda = \lambda \oplus e_m \oplus X \oplus \lambda = X \oplus e_m$. В результате А получает последовательность X . Вероятность ошибки в основном канале остается прежней p_m . Доказано [8], что оптимальной обработкой для В будет сложение по модулю 2 последовательности γ , полученной с помощью канала утечки, ($\gamma = \lambda \oplus e_w$, где e_w – образец ошибок в канале утечки) с последовательностью Y , которая была получена в результате утечки к нарушителю Е информации, передаваемой от легального пользователя В к пользователю А по БК. В результате Е получает последовательность Z , для которой $Z = \gamma \oplus Y = \lambda \oplus e_w \oplus Y = \lambda \oplus e_w \oplus \psi \oplus X = \lambda \oplus e_w \oplus \lambda \oplus e_m \oplus X = X \oplus e_w \oplus e_m$. Вероятность

ошибки в Z равна:

$$\tilde{p}_w = p_w + p_m - 2p_w p_m. \quad (2)$$

Заметим, что $\tilde{p}_w \geq p_w$ во всех случаях и выполняется со знаком равенства для случая $p_m = 0$.

Проанализировав основные свойства протокола можно сделать выводы:

1. $R = 1$, т. к. по основному каналу (ОК) передавалась последовательность λ длиной N бит и D определяется длиной последовательности X , т. е. $D = N$ и при определении R (см. 2) не учитывается длина переданной последовательности X по БК.

2. Для достижения максимального значения $\frac{\tilde{p}_w}{\tilde{p}_m}$ протокол лучше работает при $p_m = p_w$, в этом случае $\frac{\tilde{p}_w}{\tilde{p}_m} \cong 2$ ($\tilde{p}_w \cong 2p_w$), что особенно очевидно при $p_m \ll 1$.

3. Не имеет смысла применять протокол, если $p_m = p_w \cong 0,5$ или $p_w < p_m \cong 0,5$.

Протокол с кодом повторения и решающей обратной связью. Протокол реализуется следующим образом. Каждый из символов последовательности X , случайно вырабатываемых А, повторяется n раз и передается к В по основному каналу. В принимает каждое из слов кода повторения, если все его элементы или «1» или «0» и выносит решение об информационном символе, соответствующем принятому кодовому слову. В противном случае В стирает это кодовое слово. Решение о принятых кодовых словах передается по бесшумному каналу к А. Пользователи А и В сохраняют в последовательностях X и Y символы, которые не были стерты. Е также может удалять символы, которые были стерты легальными пользователями. Однако соответствующие символы, сохраняемые Е, недостаточно надежны, т. к. ошибки, которые возникают в ОК не зависят от ошибок, возникающих в канале утечки.

Вероятность ошибки на бит для принятых информационных символов В равна

$$\tilde{p}_m = p_m^n / p_{ac}, \quad (3)$$

где p_{ac} – вероятность, с которой принимается блок, определяемая с помощью выражения

$$p_{ac} = p_m^n + (1 - p_m)^n. \quad (4)$$

Вероятность ошибки Е зависит от правила приема. Если предполагается, что Е использует мажоритарное правило, которое в ДСК соответствует правилу декодирования по критерию максимума правдоподобия [9, 10]. В этом случае:

$$\tilde{p}_w = \sum_{i=\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^n C_n^i p_w^i (1-p_w)^{n-i} \quad (5)$$

На основе анализа протокола можно сделать выводы:

1. $R = \frac{p_{ac}}{n}$.
2. Для улучшения качества приема в основном канале необходимо увеличивать длину кодового слова кода повторения n .
3. Не имеет смысла применять протокол, если $p_m = p_w \cong 0,5$ или $p_w < p_m \cong 0,5$.
4. Если n равно четному числу, то \tilde{p}_w больше \tilde{p}_1 , где \tilde{p}_1 определяется согласно (5) для нечетной длины блока равной $n + 1$, при одной и той же исходной вероятности p_w . Это объясняется особенностью декодирования по правилу большинства, т. к. при четной длине кодового слова в случае приема нарушителем равного числа нулей и единиц вероятность ошибочного декодирования равна 0,5.
5. При лучшем качестве канала утечки можно добиться для «виртуальных» каналов выполнения неравенства $\tilde{p}_m < \tilde{p}_w$, при подборе определенной длины кодового слова n .

Протокол ухудшения основного канала и канала утечки. Этот протокол применяется, если качество приема в канале утечки и основном канале высокое.

На передаче символ «1» кодируется блоком случайной последовательности длины v с нечетным числом 1, а символ «0» кодируется случайным двоичным блоком с четным числом 1. При приеме блок длины v декодируются в «0», если он содержит четное число 1 или в «1», если он содержит нечетное число 1. Вероятности ошибочного декодирования принятых блоков длины v в основном канале и канале утечки описываются соотношениями [10]:

$$\tilde{p}_m = (1 - (1 - 2p_m)^v) / 2 \quad (6)$$

и

$$\tilde{p}_w = (1 - (1 - 2p_w)^v) / 2.$$

Из анализа протокола можно сделать выводы:

1. $R = \frac{1}{v}$, т. к. каждый информационный символ кодируется блоком двоичных символов длины v .
2. Для большего ухудшения качества приема в основном канале и канале утечки необходимо увеличивать длину кодового слова v .

Далее рассмотрим процедуру исправления ошибок. Процедура исправления ошибок может быть реализована использованием *помехоустойчивого кодирования*. Для этого А с помощью некоторого конструктивного линейного кода находит проверочные символы к информационной последовательности X^N и посылает проверочные символы к В по бесшумному каналу. В исправляет ошибки в Y^N , используя проверочные символы и конструктивный алгоритм декодирования для выбранного кода. В [11] показано, что если вместе с информационными символами длиной N бит по каналу с шумом передаются символы проверки длиной r бит, то число символов проверки r удовлетворяет неравенству:

$$r \geq (N + r)h(p_m). \quad (7)$$

Однако предполагается, что проверочные символы r передаются по каналу БК. Поэтому необходимо пересмотреть неравенство (7).

Пусть информационные символы $(N + r, N)$ помехоустойчивого кода передаются по двоичному симметричному каналу с вероятностью ошибки p_m , а проверочные – по бесшумному каналу.

Так как информационные символы передаются по ДСК с пропускной способностью $C_m = 1 - h(p_m)$ за N тактов, а проверочные – по ДСК с пропускной способностью, равной 1, за r тактов, то общая пропускная способность обоих каналов может быть определена на основе границы разделения времени по формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{N}{N + r} C_m + \frac{r}{N + r}. \quad (8)$$

Тогда $P_e \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$, если скорость кода R_k

$$R_k = \frac{N}{N + r} \leq C_{\text{общ}}, \quad (9)$$

или

$$\frac{N}{N + r} \leq \frac{N}{N + r} C_m + \frac{r}{N + r}. \quad (10)$$

Отсюда

$$N \leq NC_m + r, \quad (11)$$

или

$$r \geq N - NC_m = Nh(p_m). \quad (12)$$

Тогда при $N \rightarrow \infty$, вероятность ошибочного декодирования $P_e \rightarrow 0$, если $r \geq Nh(p_m)$.

При конечной длине используемого кода и заданной величине $P_E^{\text{доп}}$, необходимое число символов проверки r может быть определено, согласно

$$\frac{r}{N+r} \geq h\left(\frac{d-2}{N+r-1}\right), \quad (13)$$

$$P_E^{\text{доп}} \leq \sum_{i=\lfloor \frac{d-1}{2} \rfloor + 1}^N C_N^i \tilde{p}_m^i (1 - \tilde{p}_m)^{N-i}, \quad (14)$$

где \tilde{p}_m получена из (5), если в качестве протокола использовался протокол с кодом повторения, или из (6), если предварительно использовался протокол ухудшения основного канала и канала утечки; или $\tilde{p}_m = p_m$, если предварительно использовался

протокол с передачей случайной последовательности. В общем случае эта вероятность определяется вероятностью ошибки «виртуального» канала. (8) – граница Варшамова–Гильберта для минимального кодового расстояния d двоичного $(N+r, N)$ кода [12, 13].

Применение первого и второго протоколов по отдельности или в комбинации позволяет создать предпосылки для формирования «виртуальных» основного канала и канала утечки. В то же время использование помехоустойчивого кодирования позволяет исправить ошибки «виртуального» основного канала. Нарушителю явно недостаточно использования информации, передаваемой при помехоустойчивом кодировании, он не может исправить все ошибки «виртуального» канала утечки. Поэтому модель процесса, рассмотренного в статье, формирует «виртуальные» каналы независимо от соотношения по качеству канала утечки и основного канала. Это позволяет снять ограничение о нарушителе, связанное с точным знанием количественной оценки качества канала утечки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике [Текст]/К. Шеннон; под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова. – М.: Иностранная литература, 1963.
2. Wyner, A. The wire-tap channel [Текст]/A. Wyner// Bell Syst. Techn. J.–1975.–Vol. 54.–№ 8.–P. 1355–1387/
3. Мак-Вильямс, Ф. Теория кодов, исправляющих ошибки [Текст]/Ф. Мак-Вильямс, Н. Слоэн. –М.: Связь, 1979.–744 с.
4. Коржик, В.И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений [Текст]/ В.И. Коржик, Л.М. Финк, К.Н. Щелкунов. –М.: Радио и связь, 1981.–231 с.
5. Ahlswede, R Common randomness in information theory and cryptography – Part 1: Secret sharing [Текст]/R. Ahlswede, I. Csiszar//IEEE Trans. on IT.–1993.–Vol. 39.–№ 4.–P. 1121–1132.
6. Csiszar, I. Broadcast channels with confidential messages [Текст]/I. Csiszar, J. Korner//IEEE Trans. on IT.–1978.–Vol. 24.–№ 3.–P. 339–348.
7. Maurer, U. Protocols for Secret Key Agreement by Public Discussion Based on Common Information [Текст]/U. Maurer//Advances in Cryptology – CRYPTO '92, Lecture Notes in Computer Science, Berlin: Springer–Verlag, 1993.–Vol. 740.–P. 461–470.
8. Maurer, U. Secret Key Agreement by Public Discussion Based on Common Information [Текст]/U. Maurer//IEEE Trans. on IT.–May 1993. –Vol. 39.–P. 733–742.
9. Bennett, C. Privacy amplification against probabilistic information [Текст]/C. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau [et al.]/ IEEE Trans. on IT.–1993.–№ 4.
10. Maurer, U. Information – Theoretically Secure Secret – Key Agreement by not Authenticated Public Discussion [Текст]/U. Maurer//Advances in Cryptology – EUROCRYPT '97; W. Fumy (Eds.); Lecture Notes in Computer Science.–Berlin: Springer–Verlag.–1997.
11. Maurer, U. Towards characterizing when information - theoretic secret key agreement is possible [Текст]/U. Maurer, S. Wolf//Advances in Cryptology – ASIACRYPT '96; K. Kim, T. Matsumoto (Eds.); Lecture Notes in Computer Science.–Berlin: Springer–Verlag.–1996.–Vol. 1163.–P. 145–158.
12. Мак-Вильямс, Ф. Теория кодов, исправляющих ошибки [Текст]/Ф. Мак-Вильямс, Н. Слоэн. –М.: Связь, 1979.–744 с.
13. Коржик, В.И. Расчет помехоустойчивости

систем передачи дискретных сообщений [Текст]/
В.И. Коржик, Л.М. Финк, К.Н. Щелкунов. –М.: Радио
и связь, 1981.–231 с.

14. **Wyner, A.** The wire-tap channel [Текст]/A. Wyner//

Bell Syst. Techn. J.–1975.–Vol. 54.–№ 8.–P. 1355–1387.

15. **Феллер, В.** Введение в теорию вероятности
и ее приложения [Текст]/В. Феллер. –М.: Мир, 1967.
–498 с.

УДК 621.37

Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, В.Г. Манжула

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ПРИ НИЗКООМНОЙ НАГРУЗКЕ

В современной аналоговой микроэлектронике широко применяются дифференциальные усилители (ДУ) с активными нагрузками в виде токовых зеркал на биполярных транзисторах, тип проводимости которых противоположен типу проводимости входных транзисторов ДУ. Для повышения коэффициентов усиления по напряжению (K_v) применяются схемы со «следящим» питанием токового зеркала, которое обеспечивается за счет вспомогательного повторителя напряжения, передающего выходной сигнал токового зеркала в цепь его эмиттерного выхода [1–5].

Существенный недостаток ДУ этого класса состоит в том, что при низкоомной нагрузке $R_n = 50\text{--}100$ Ом и классическом построении буферного усилителя на основе эмиттерного повторителя его K_v получается небольшим. Улучшение в 8–10 раз при $R_n = 50 \div 100$ Ом может обеспечить рассмотренное ниже схемотехническое решение, использующее принцип взаимной компенсации паразитных импедансов.

Схема предлагаемого ДУ показана на рис. 1. Параметры первого БУ1 и второго БУ2 буферных усилителей, а также параметры первой R_{n1} и второй R_{n2} цепей нагрузки должны удовлетворять условию:

$$R_{n1} K_{i,1} = R_{n2} K_{i,2},$$

где $K_{i,1}$, $K_{i,2}$ – коэффициенты усиления по току БУ1 и БУ2; R_{n1} , R_{n2} – эквивалентные сопротивления цепей нагрузки.

Рассмотрим работу схемы при низкоомной нагрузке R_n и $K_{i,1} \neq \infty$, $K_{i,2} \neq \infty$ (например, $K_{i,1} = K_{i,2} = 50$).

В статическом режиме коллекторные токи (I_{ki}) транзисторов VT1 и VT2 устанавливаются двухполюсником I_1 :

$$I_{k1} = I_{k2} = 0,5I_1 = I_0, \quad (1)$$

где $I_0 = I_1 / 2$.

Через эмиттерный выход токового зеркала ПТ1 при введении общей отрицательной обратной связи протекает статический ток, равный $2I_0$. Для минимизации напряжения смещения нуля ДУ ($U_{см}$) рекомендуется выбирать ток двухполюсника I_2 на уровне

$$I_2 = 2I_1 = 4I_0. \quad (2)$$

В качестве буферных усилителей БУ1 и БУ2 при работе в ВЧ и СВЧ диапазонах следует использовать классические эмиттерные повторители на одиночных n-p-n транзисторах или так называемые «бриллиантовые» транзисторы. Цепи нагрузки R_{n1} и R_{n2} могут иметь непосредственную или емкостную связь с буферными усилителями БУ1 и БУ2.

При реализации ДУ по SiGe технологии SG25VD, внедряемой российскими предприятиями, токовое зеркало ПТ1 и повторитель напряжения ПН1 могут быть реализованы на КМОП транзисторах.

Если на вход $V_{x.}^{(+)}$ подается напряжение $u_{вх}$, то это вызывает увеличение коллекторного тока транзистора VT1 и уменьшение коллекторного тока транзистора VT2. Как следствие, увеличивается напряжение на токовом выходе 1 ($u_1 > 0$) и напряжение в нагрузке R_{n1} ($u_{n1} \approx u_1$). При этом за счет передачи напряжения u_1 в узел 3 и далее на первый токовый выход обеспечивается равенство

$$u_3 \approx u_1 \approx u_2 \approx u_{n2} \approx u_{n1}. \quad (2)$$

Как следствие, в цепи выходов (1) и (2) возникают приращения токов i_1 и i_2 :

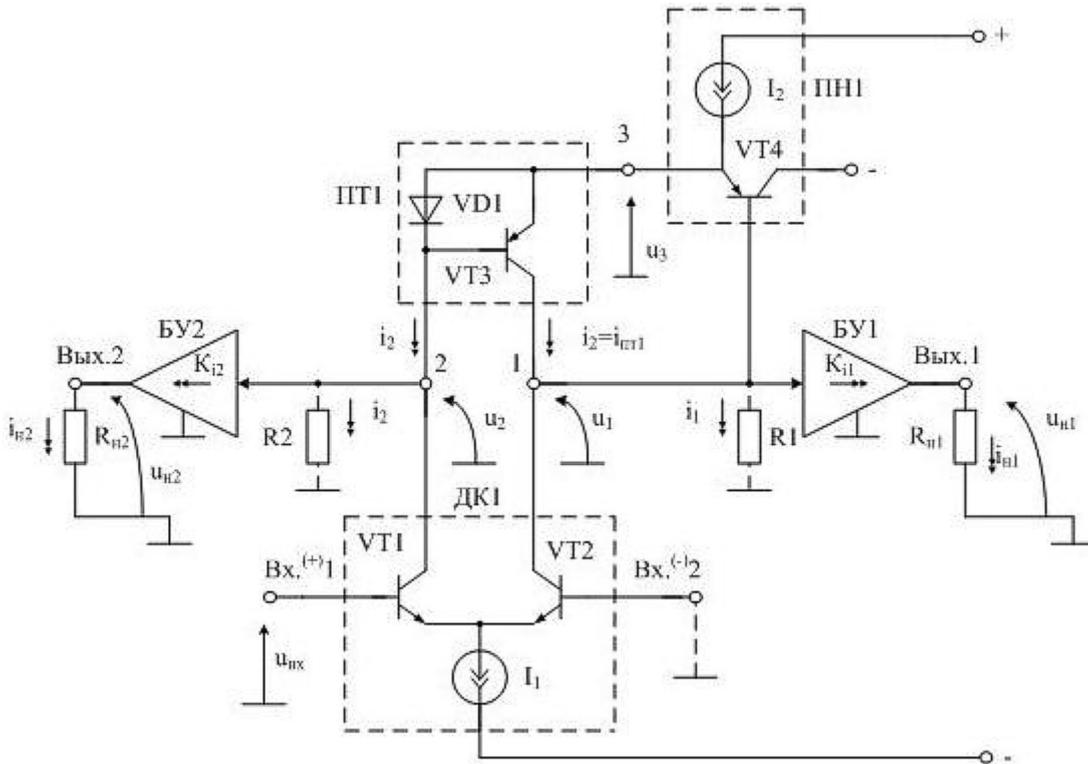


Рис. 1. Архитектура ДУ с повышенным коэффициентом усиления

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2}, \quad i_1 = \frac{u_1}{r_1}, \quad (3)$$

где $R_{н1}, R_{н2}$ – эквивалентные сопротивления первой и второй цепей нагрузки; $r_2 \approx K_{i2} R_{н2}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки $R_{н2}$, приведенное к узлу 2; $r_1 \approx K_{i1} R_{н1}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки $R_{н1}$, приведенное к узлу 1; K_{i2}, K_{i1} – коэффициенты усиления по току буферных усилителей БУ2 и БУ1 ($K_{i2} = 20 \div 80, K_{i1} = 20 \div 80$).

Приращение тока i_2 поступает на выход токового зеркала ПТ1. Поэтому в узле 1 происходит взаимная компенсация двух близких по величине токов $i_{пт1} = i_2$ и i_1 . Разный ток в этом узле (1):

$$\begin{aligned} i_p &= i_1 - i_{пт1} = i_1 - i_2 = \\ &= u_1 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{u_1}{r_1} \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $i_{пт1}$ – выходной ток токового зеркала ПТ1.

Если выбрать $r_1 = r_2$, то в этом случае эффективное сопротивление в цепи первого токового выхода (1) существенно возрастает:

$$r_{1.эф} = \frac{r_1}{\left| 1 - \frac{r_1}{r_2} \right|} \gg r_1. \quad (5)$$

Поэтому коэффициент усиления по напряжению ДУ (рис. 1) увеличивается:

$$K_{y.max} = \frac{r_{1.эф}}{r_{s1} + r_{s2}} \gg \frac{r_1}{r_{s1} + r_{s2}}, \quad (6)$$

где $r_{s1} = r_{s2} = \frac{\varphi_T}{I_0}$ – сопротивления эмиттерных переходов транзисторов VT1 и VT2; $\varphi_T = 26$ мВ – температурный потенциал.

В классическом ДУ [1] эквивалентное сопротивление в узле 1:

$$r_1 \approx K_{i1} R_{н1}. \quad (7)$$

Таким образом, выигрыш по коэффициенту усиления, который обеспечивает схема на рис. 1, определяется как

$$N_y = \frac{K_{y.n.пре}}{K_{y.кл.}} = \frac{1}{\left| 1 - \frac{K_{i1} R_{н1}}{K_{i2} R_{н2}} \right|} \gg 1. \quad (8)$$

Если выбрать $K_{i1} R_{н1} = K_{i2} R_{н2}$, то $N_y \gg 1$.

Дальнейшим развитием схемы на рис. 1 является схема на рис. 2, в которой обеспечивается взаимная компенсация не только сопротивлений цепей нагрузки $R_{н2}$ и $R_{н1}$, но и эквивалентных сопротивлений $R1$ и $R2$, которые нагружают выходы эмиттерных повторителей ПН1 и ПН2. Такая

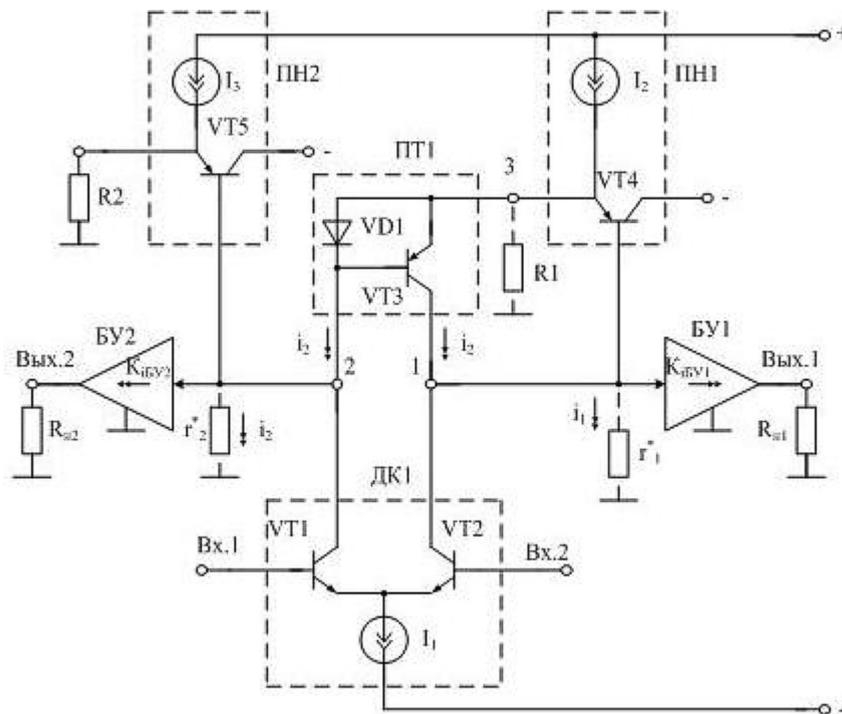


Рис. 2. Способ взаимной компенсации влияния на K_y сопротивлений двухполюсников I_2 и I_3

ситуация возникает в ряде частных случаев построения, например, прецизионных операционных усилителей.

Для данного варианта ДУ необходимо одновременно обеспечить равенства:

$$K_{\text{ПН2}} R_2 = K_{\text{ПН1}} R_1, \quad (9)$$

$$K_{\text{БУ1}} R_{\text{н1}} = K_{\text{БУ2}} R_{\text{н2}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{ПН}}$ – коэффициент передачи по току повторителей напряжения ПН; $K_{\text{БУ}}$ – коэффициент передачи по току буферных усилителей.

В этом случае эквивалентные сопротивления в узлах 2 и 1 будут одинаковы ($r_1^* = r_2^*$), что является одним из условий повышения K_y .

На рис. 3 показана схема классического ДУ с $R_{\text{н2}} = R_4 = \infty$ (рис. 3, а) и схема предлагаемого ДУ с $R_{\text{н2}} = R_4 = R_{\text{н1}} = R_5 = 50$ Ом (рис. 3, б) в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар», а на рис. 4 – зависимость коэффициента усиления по напряжению сравниваемых схем (без элементов частотной коррекции). Данные графики показывают, что при низкоомной нагрузке

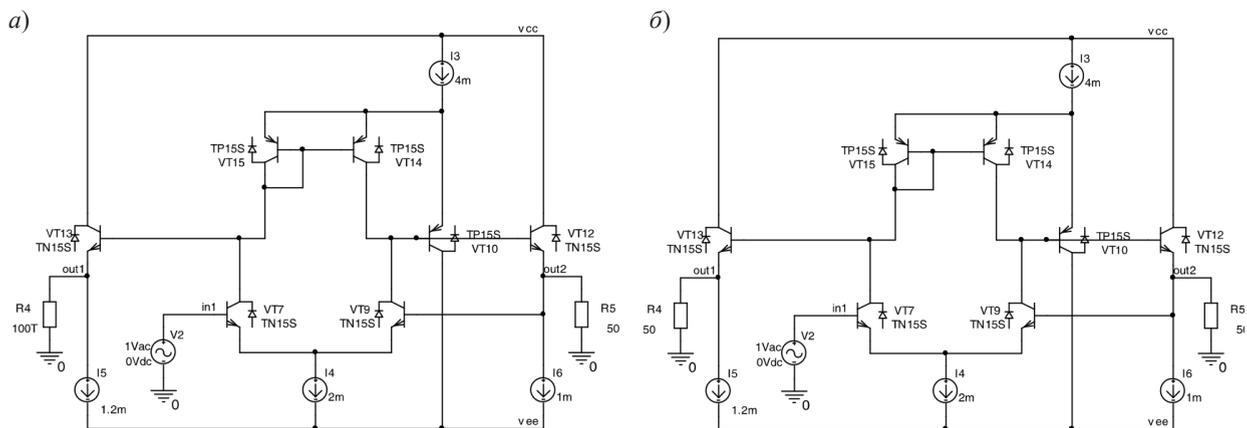


Рис. 3. а – схема ДУ при $R_{\text{н}} = \infty$; б – схема предлагаемого ДУ при $R_{\text{н}} = 50$ Ом в среде компьютерного моделирования PSpice

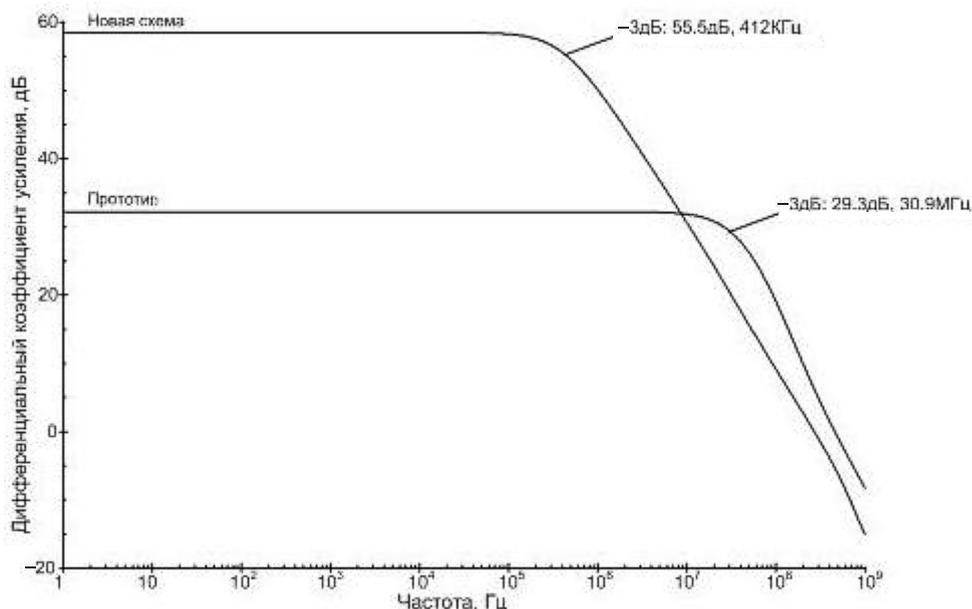


Рис. 4. Зависимость коэффициентов усиления по напряжению сравниваемых схем от частоты (без элементов коррекции)

(50 Ом), коэффициент усиления по напряжению предлагаемого ДУ улучшается на 26 дБ. Это важное достоинство данных схем при их реализации в рамках технологических процессов SG25H2 с малыми напряжениями питания транзисторов.

Представленные на рис. 4 графики подтверждают теоретические выводы. Моделирование схем показывает, что при выборе $R_{н2}$ несколько меньше, чем $R_{н1}$, выигрыш по K_y увеличивается

на 25÷30 дБ. Причем K_y достигает величины 55÷60 дБ при $R_{н1} = 50$ Ом.

Применение принципов взаимной компенсации импедансов позволяет обеспечить построение дифференциальных усилителей с повышенным коэффициентом усиления без увеличения числа последовательно соединенных транзисторных каскадов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент США № 4.857.862, fig. 1
2. Патент США № 4.595.883, fig. 7
3. Патентная заявка США № 2005/00358216 fig. 4
4. Патент США № 2006/0044068 fig. 1a
5. Авторское свидетельство СССР № 987605

УДК 621.371.25;550.388.2

А.Е. Недопёкин, А.А. Колчев, В.В. Шумаев

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛЧМ СИГНАЛА

Один из основных параметров ионосферной радиолонии, влияющих на надежность и помехоустойчивость работы радиотехнических систем, —

дифференциальный доплеровский сдвиг между лучами. Ионосферный канал распространения — многолучевой, нестационарный, обладающий

частотно-временной дисперсией, способной влиять на точность получаемых оценок.

В [1] предложен способ одновременного измерения доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания каждой моды посредством двух сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов), при этом для измерения доплеровского смещения используются значения фаз принятых сигналов. Непосредственная реализация способа требует двух идентичных передатчиков и двух приемников. В [2] разработана методика реализации данного способа посредством одного передатчика и одного приемника за счет использования амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала, но в ней не рассмотрено влияние шумовой составляющей и воздействие частотно-временной дисперсии ионосферного радиоканала на точность измерений.

Цель данной статьи – исследование влияния шума и частотно-временной дисперсии ионосферного радиоканала на точность определения доплеровского смещения частоты отдельных мод распространения с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала.

Определение доплеровского смещения. При определении доплеровского смещения частоты по способу, описанному в [1], одновременно излучаются два одинаковых непрерывных ЛЧМ сигнала, один из которых запаздывает на время T относительно другого – $a(t)$ и $a(t - T)$, соответственно. Прошедшие ионосферу сигналы принимаются на два приемника, гетеродины которых имеют аналогичное временное смещение относительно друг друга. Измеряются фазы сигналов на выходе приемников: $\varphi_1(t)$ для первого приемника и $\varphi_2(t - T)$ – для второго. Величина $\frac{\varphi_1(t) - \varphi_2(t - T)}{T}$ определяет доплеровское смещение частоты в момент времени t .

Для ЛЧМ сигналов существует связь между частотой f и временем излучения сигнала t : $f = f_H + \pi \cdot \dot{f} \cdot t$, где $\dot{f} = \frac{df}{dt}$ – скорость изменения частоты, f_H – начальная частота излучения. Таким образом, получаем непрерывную зависимость доплеровского смещения частоты от частоты излучения.

Существует возможность реализации этого способа путем синтеза двух сигналов с помощью амплитудной модуляции с подавлением несущей. Две спектральные составляющие, получающиеся

в результате модуляции, будут эквивалентны двум сигналам. Рассмотрим более подробно данную методику.

Пусть передатчик излучает непрерывный амплитудно-модулированный ЛЧМ сигнал, который можно представить следующим образом:

$$a_1(t) = a_0 \exp[j(2\pi(f_H + f_M)(t - t_0) + \pi \cdot \dot{f}(t - t_0)^2)] + a_0 \exp[j(2\pi(f_H - f_M) \times (t - t_0) + \pi \cdot \dot{f}(t - t_0)^2)], \quad t \in [t_0, t_0 + t_K], \quad (1)$$

где f_M – модулирующая частота; a_0 – амплитуда сигнала; t_0 – время начала излучения; t_K – длительность излучения.

Рассмотрим обработку в приемнике принятого ЛЧМ сигнала на примере второго слагаемого из (1) – $a_2(t)$. Обработка методом сжатия в частотной области описывается следующими математическими соотношениями [3]:

$$A_2(t) = a_{2\text{вых}}(t) a^*(t), \quad (2)$$

$$S_2(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_2(t) e^{-j\Omega t} dt,$$

где $a^*(t) = \exp[-j(2\pi \cdot f_H(t - t_0) + \pi \cdot \dot{f}(t - t_0)^2)]$ – сигнал гетеродина приемника; $A_2(t)$ – сигнал разностной частоты, соответствующий излученному сигналу $a_2(t)$; $S_2(\Omega)$ – его спектр; $a_{2\text{вых}}(t)$ – сигнал $a_2(t)$ на выходе ионосферной радиолонии (на входе приемника).

При обработке сжатого по частоте ЛЧМ сигнала, сигнал разностной частоты разбивается на N элементов длительностью T_3 с шагом между элементами T , и для каждого элемента выполняется преобразование Фурье [3]. Поскольку при ионосферном зондировании $\Delta f_3 = \dot{f} \cdot T_3 \ll f$ (f – текущая частота), то каждый элемент разностного сигнала относят к центральной частоте элемента Δf_3 . Соответственно, спектр элемента сигнала также можно отнести к этой частоте.

Передаточную функцию многолучевого нестационарного канала распространения можно представить в виде:

$$H(\omega, t) = |H(\omega, t)| \cdot \exp j \varphi(\omega, t) = \sum_{i=1}^m |H_i(\omega, t)| \cdot \exp j \varphi_i(\omega, t), \quad (3)$$

где $|H_i(\omega, t)|$ – модуль передаточной функции отдельного луча; $\varphi_i(\omega, t)$ – набег фазы отдельного луча в ионосферной радиолонии; m – число мод распространения.

Элемент зондирующего сигнала занимает некоторую полосу $\Delta f_3 = \dot{f} \cdot T_3$ около частоты f_0 .

Считая канал квазистационарным для небольших масштабов времени $\Delta t = t - t_0$, фазу передаточной функции отдельного луча, при отсутствии частотной дисперсии, можно разложить в ряд Тейлора по степеням $\Delta\omega = 2\pi(f - f_0)$ и Δt , ограничившись линейными слагаемыми, а $H_i(\omega, t)$ считать постоянным:

$$\begin{aligned} \varphi_i(\omega, t) &\approx \varphi_i(\omega_0, t_0) + \varphi'_{it}(\omega_0, t_0)\Delta t + \varphi'_{i\omega}(\omega_0, t_0)\Delta\omega; \\ |H_i(\omega, t)| &= |H_{0i}| = \text{const}. \end{aligned} \quad (4)$$

Первая производная по времени связана с доплеровским смещением частоты $F_{\partial t}$, а первая производная по частоте – со временем запаздывания сигнала τ . С учетом квазистационарности и отсутствия частотной дисперсии доплеровское смещение и время запаздывания считаются постоянными в полосе частот элемента сигнала за время его длительности:

$$\begin{aligned} \varphi'_{it}(\omega_0, t_0) &= -2\pi F_{\partial t}(\omega_0, t_0) = -2\pi F_{\partial i0} = \text{const}; \\ \varphi'_{i\omega}(\omega_0, t_0) &= \tau_i(\omega_0, t_0) = \tau_{0i} = \text{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отдельный элемент разностного сигнала $A_2(t)$ на протяжении T_{Σ} представляет собой отрезок гармонического колебания. Спектр элемента $S_2(\Omega)$ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} S_2(\Omega) &= a_0^2 T_{\Sigma} \sum_{i=1}^m |H_{0i}| \exp[j\varphi_i(\omega_0, t_0)] \times \\ &\times \sin c\left(\frac{\Omega - 2\pi(f\tau_{0i} - F_{\partial i0} + f_M)T_{\Sigma}}{2}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sin c(x) = \frac{\sin x}{x}$, $\omega_0 = 2\pi(f_H - f_M)$, $\varphi_i(\omega_0, t_0)$ – фаза спектральной составляющей отдельной моды.

При поэлементной обработке полученного непрерывного ЛЧМ сигнала каждый k -й элемент разностного сигнала, соответствующий времени t_0 , обозначим $A_1(t)$, а каждый $(k + 1)$ -й, соответствующий времени $t_0 + T$, обозначим как $A_{II}(t)$. Зададим смещение на время T элемента $(k + 1)$ относительно k -го элемента как

$$T = \frac{2f_M}{\dot{f}}. \quad (7)$$

В силу амплитудной модуляции в спектре каждого элемента принимаемого сигнала каждой моде будут соответствовать две спектральных составляющих с разностью частот $2f_M$. Вторая спектральная составляющая для i -й моды k -го элемента сигнала определяется ранее полученным выражением (6). Обозначим ее $S_{I,2}(\Omega)$ (рис. 1, а), а первую спектральную составляющую для i -й моды $(k + 1)$ -го элемента обозначим $S_{II,1}(\Omega)$ (рис. 1, б).

В излучаемом сигнале этой спектральной составляющей соответствует первое слагаемое в (1), записанное с учетом (7):

$$\begin{aligned} a_{II,1}(t) &= a_0 \exp[j(2\pi(f_H - f_M)(t - t_0) - f_H T - \\ &- f_M T + \pi \cdot \dot{f}(t - t_0)^2 + \pi \cdot \dot{f} \cdot T^2)], \end{aligned} \quad (8)$$

$$t \in [t_0 + T, t_0 + t_K + T].$$

Для разностного сигнала $(k+1)$ -го элемента получим:

$$\begin{aligned} S_{II,1}(\Omega) &= a_0^2 T_{\Sigma} \sum_{i=1}^m |H_{0i}| \exp[j\varphi_i(\omega_0, t_0 + T)] \times \\ &\times \sin c\left(\frac{\Omega - 2\pi(f\tau_{0i} - F_{\partial i0} - f_M)T_{\Sigma}}{2}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

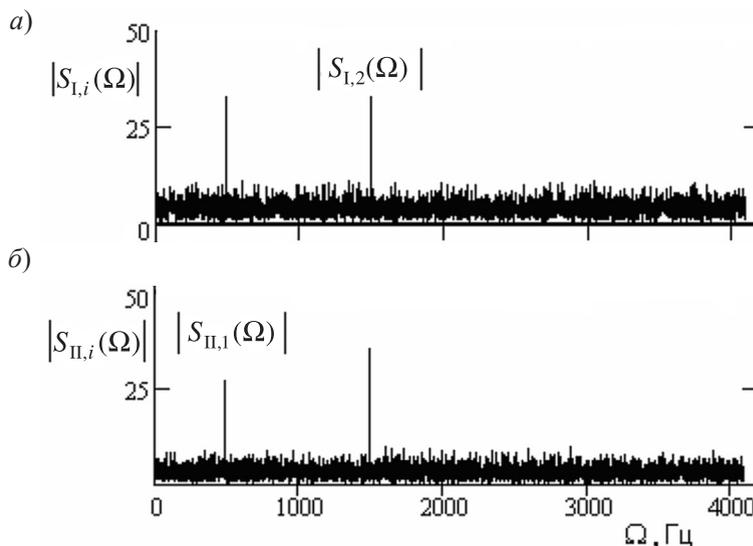


Рис. 1. Гармоники спектров, используемые для измерения: а – k -й спектр; б – $(k+1)$ -й спектр

Здесь $\varphi_i(\omega_0, t_0 + T) = \varphi_i(\omega_0, t_0) + 2\pi f_M T + 2\pi T F_{\partial i0}$.

При сравнении выражений (6) и (9) видно, что в обоих выражениях совпадают амплитуды, а различаются только фазы. При этом в выражении (9) $\varphi_i(\omega_0, t_0 + T)$ содержит слагаемое $2\pi f_M \cdot T$. Если значения f_M и T выбрать так, чтобы произведение $f_M \cdot T$ являлось целым числом, то разность фаз между спектральными составляющими $S_{ii,1}(\Omega)$ и $S_{ii,2}(\Omega)$ составит $2\pi F_{\partial i0} \cdot T$.

Смещение T необходимо выбирать таким образом, чтобы $|\Delta\varphi_i| = |2\pi F_{\partial i0} T| \in (0; \pi)$. Тогда $T \in (0; \frac{1}{2|F_{\partial i0}|})$. При ионосферном распространении коротких волн обычно выполняется условие $F_{\partial i0} < 10$ Гц. Следовательно, смещение должно быть меньше 0,05 с.

Если φ_{lik} и φ_{lilk} – фазы спектральных составляющих $S_{li,2}(\Omega)$ и $S_{li,1}(\Omega)$ для некоторых k -го и $(k+1)$ -го элементов разностного сигнала, соответственно, то доплеровское смещение частоты для элемента сигнала каждой i -й моды распространения с центральной частотой $f_{0k} = f_H + f \cdot T(k - \frac{1}{2})$ находится по формуле:

$$F_{\partial ik} = \frac{\varphi_{lik} - \varphi_{lilk}}{2\pi \cdot T}. \quad (10)$$

Шумы КВ-диапазона. Использование фазовых измерений предполагает большую чувствительность к мощности шумов. По данным экспериментальных исследований фонового шума, записанного с выхода системы сжатия в частотной области в разное время суток на протяжении года, установлены следующие факты. Имеет место некоррелированность фаз спектральных отсчетов шума: коэффициент корреляции для фаз составляет не более 0,1, радиус корреляции – менее 0,01 с. Фаза спектральных отсчетов имеет распределение, подчиняющееся преимущественно равномерному закону на отрезке $[-\pi, \pi]$ (более чем в 85 % спектров). Установлено также, что значения амплитуд спектральных отсчетов при сдвиге между элементами анализа на время T менее 0,05 с подвергаются слабому изменению – не более 6 %. Это позволяет считать отношения сигнал–шум для соседних элементов анализа приблизительно одинаковыми. В [4] было получено выражение для погрешности, вносимой случайной шумовой гармоникой в определение фазы спектральной компоненты сигнала:

$$\delta(\varphi) = \arctg \frac{X \sin \varphi}{1 + X \cos \varphi}, \quad (11)$$

где φ – случайная фаза шумовой компоненты; X – отношение шум/сигнал N/S .

При вычислении разности фаз в (10) имеет место погрешность, являющаяся разностью погрешностей определения каждой фазы:

$$\Delta_\varphi = \delta(\varphi_{lik}) - \delta(\varphi_{lilk}). \quad (12)$$

С учетом установленных свойств фонового шума, для разности погрешностей было получено выражение для дисперсии погрешности Δ_φ :

$$D(\Delta_\varphi) = \left(\frac{N}{S}\right)^2. \quad (13)$$

Таким образом, точность определения доплеровского смещения как среднееквадратическое отношение для измеренных значений будет определяться так:

$$\sigma(F_\partial) = \frac{1}{2\pi \cdot T} \left(\frac{N}{S}\right). \quad (14)$$

Значение точности не зависит от конкретных значений шумовых гармоник, складывающихся со спектральными компонентами сигнала, и будет увеличиваться прямопропорционально увеличению отношения сигнал–шум S/N . Сравнение точности, оцененной по указанной формуле, с аналогичными значениями, полученными путем полуэмпирического моделирования с использованием реальных шумов, представлено на рис. 2 (точность, оцененная по формуле, показана курсивом).

Как видно из рисунка, между точностью и отношением сигнал–шум логарифмическая зависимость. Точность возрастает в два раза при увеличении S/N примерно на 6 Дб, зная отношение сигнал–шум, можно определить точность измерений. В среднем, точность в 0,1 Гц возможна при преодолении порога в 45 Дб.

Влияние временной дисперсии. Для рассмотрения временной дисперсии квазистационарность канала была нарушена добавлением в разложение фазы слагаемого с производной второго порядка по времени, что соответствует скорости изменения доплеровского смещения частоты:

$$\varphi''_i(\omega_0, t_0) = -2\pi \frac{\partial F_\partial}{\partial t} = -2\pi F'_{\partial i}. \quad (15)$$

Рассмотрим одну пару элементов анализа: слагаемые амплитудно-модулированного сигнала, соответствующие спектральным гармоникам, участвующим в вычислениях. Для удобства аналитических построений предположим,

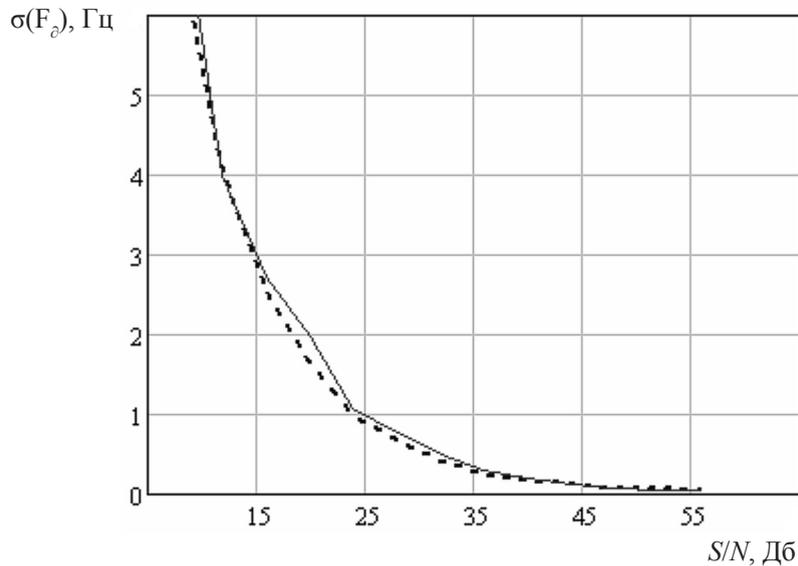


Рис. 2. Зависимость среднеквадратической погрешности измерения от отношения сигнал–шум

что они являются ЛЧМ импульсами колоколообразной формы с амплитудными множителями

$$U(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\pi T_3}\right).$$

С учетом измененной передаточной функции были получены спектры для данных ЛЧМ импульсов. Для первого элемента:

$$S_{1,2} = M \cdot \exp(j(\varphi(\omega_0, t_0) + \pi \cdot \tau^2 \dot{f})) \times \exp\left(-\frac{T_3^2 (\Omega - 2\pi(\dot{f}\tau - f_M - F_\partial))^2}{4(1 - \pi F'_{\partial t} T_3^2)}\right), \quad (16)$$

где $\omega_0 = 2\pi(f_H - f_M)$, $M = \frac{\sqrt{\pi}|H_0| \cdot t_K}{\sqrt{1 - \pi F'_{\partial t} T_3^2}}$.

Для второго элемента, смещенного относительно первого на время T :

$$S_{1,2}(\Omega) = M \cdot \exp(j(\varphi(\omega_0, t_0) + \pi \cdot \tau^2 \dot{f})) \times \exp[j(-2\pi T(F_\partial - f_M) - \pi F'_{\partial t} T^2)] \times \exp\left(-\frac{T_3^2 \left(\Omega - 2\pi\left(\dot{f}\tau + f_M - F_\partial - \frac{F'_{\partial t} \cdot T}{2}\right)\right)^2}{4(1 - \pi F'_{\partial t} T_3^2)}\right). \quad (17)$$

Было проведено имитационное моделиро-

вание, вычислялись разности аргументов спектральных отсчетов в (16) и (17), которые соответствовали зондирующему сигналу. Исследовалась ошибка определения доплеровского смещения из-за временной дисперсии и потери мощности $\delta(S/N)$ из-за уширения спектра в зависимости от значения $F'_{\partial t}$. Полученные зависимости для ошибки определения доплеровского смещения δF_∂ и потери мощности из-за уширения спектра приведены в таблице и на рис. 3, а, соответственно. Данные получены для обычных параметров ЛЧМ зондирования ($f = 100$ кГц/с, $T_3 = 1$ с) и частоте амплитудной модуляции $f_M = 500$ Гц.

Как видно из таблицы, временная дисперсия слабо влияет непосредственно на фазовые измерения, а возникающая ошибка изменяется по линейному закону. Более ощутимой будет потеря точности, связанная с потерей мощности сигнала. Из формулы (14) и рис. 2 и 3, а следует, что при $F'_{\partial t} = 1$ Гц/с точность уменьшится почти в два раза. При типичных изменениях доплеровского смещения во времени $F'_{\partial t} \cong 0,01-0,1$ Гц/с потери мощности не превысят 1,5 Дб, что приведет к уменьшению разрешающей способности измерения примерно на 20 %.

Влияние частотной дисперсии. Аналогично случаю временной дисперсии в запись (4) без

Зависимость погрешности измерения от временной дисперсии

$F'_{\partial t}$, Гц/с	0,01	0,1	0,2	0,4	0,8	1
δF_∂ , Гц	0,00025	0,0005	0,001	0,002	0,004	0,005

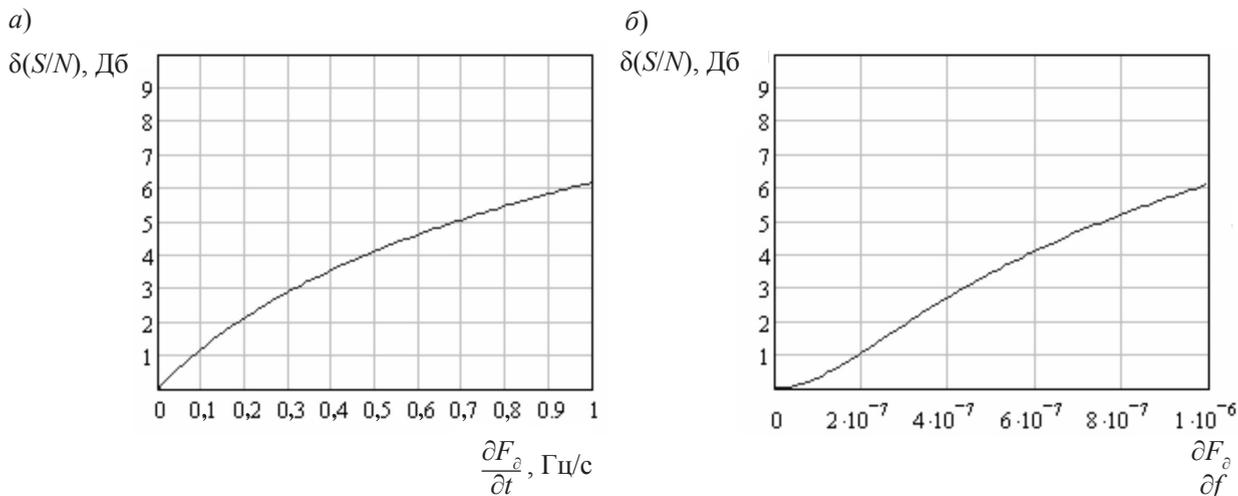


Рис. 3. Зависимость потерь мощности сигнала от: а – временной дисперсии; б – частотной дисперсии

учета номера моды были добавлены слагаемые с производными второго порядка по частоте:

$$\varphi''_{\omega_0}(\omega_0, t_0) = -2\pi \frac{\partial F_c}{\partial f} = -2\pi F'_{\omega_0}; \quad (18)$$

$$\varphi''_{\omega_0}(\omega_0, t_0) = \tau'_{\omega}.$$

Полученные при новой передаточной функции аналитические выражения для спектров колоколообразных импульсов оказались чрезвычайно громоздкими. Математическое моделирование спектров показало, что производная по частоте от времени запаздывания не влияет на точность определения доплеровского смещения. Было установлено, что верхняя оценка погрешности фазовой разности при вычислении доплеровского смещения по формуле (10) задается следующим соотношением $4\pi^2 (\dot{f} \cdot T F'_{\omega_0} \tau + (F'_{\omega_0} T)^2)$.

Для времен запаздывания односкачкового распространения сигнала при ЛЧМ зондировании (100–3000 км) ошибка в измерении доплеровского смещения, обусловленная исключительно частотной дисперсией, составит не более 0,01 Гц при изменении F'_{ω_0} вплоть до 10^{-6} .

Потери мощности сигнала при частотной дис-

персии представлены на рис. 3, б. Для типичных значений $F'_{\omega_0} \cong 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-7}$, соответствующих скорости перемещения отражающего слоя 30–100 м/с, потери мощности невелики и составляют 1–2 Дб (13–25 %). Для $F'_{\omega_0} \cong 10^{-6}$ (скорость слоя – 300 м/с) мощность за счет уширения спектра уменьшится в два раза.

Основное влияние на точность определения доплеровского смещения частоты при помощи фазовых измерений непрерывного ЛЧМ сигнала оказывают фоновые шумы и помехи. Приемлемая точность в 0,1 Гц достигается только при отношении сигнал–шум более 45 Дб. Частотно-временная дисперсия оказывает слабое воздействие на разность фаз в пределах малого временного сдвига 0,01–0,05 с между элементами анализа. Значительно более сильное влияние на точность имеет вызванное дисперсией уширение спектра, которое уменьшает мощность принимаемого сигнала в сравнении с шумом. Для компенсации потерь, связанных с уширением, необходимо использовать передатчик большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчев, А.А. Измерение частотных зависимостей доплеровского смещения частоты и времени распространения каждой ионосферной моды с помощью непрерывного ЛЧМ сигнала [Текст]/А.А. Колчев, В.В. Шумаев//Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. –Киев, 2009.–Т. 52. –№ 2.–С. 54–62.
2. Колчев, А.А. Применение амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала для измерения доплеровского смещения частоты [Текст]/А.А. Колчев, А.Е. Недопёкин, В.В. Шумаев//Тр. XV Междунар.

- науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC'2009).–Воронеж: НПФ «Саквеев» ООО, 2009.–С. 623–629.
3. Филипп, Н.Д. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере [Текст]/Н.Д. Филипп, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов [и др.].–Киев: Штиинца, 1991.–286 с.
4. Poole, A.W.V. Advanced sounding. The FMCW alternative [Текст]/A.W.V. Poole//Radio Science, 1985.–Vol. 20.–№6.–P. 1609–1616.

КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА С ЛЧМ

Ионосферный канал распространения коротких волн, являясь составной частью радиотехнических систем передачи информации декаметрового диапазона, оказывает определяющее влияние на такие параметры этих систем, как помехоустойчивость, пропускная способность, надежность и скрытность. Для реализации оптимального фильтра, максимизирующего отношение сигнал/шум на выходе канала, надо знать не только излучаемый сигнал, но и комплексную передаточную функцию канала распространения, а также зависимость спектральной плотности шума от частоты.

В последние годы для оценки комплексной передаточной функции широкополосного КВ радиоканала стали применять сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [1, 2]. В методиках, описанных в этих работах, исходят из лучевого приближения и рассматривают КВ радиоканал, как канал с дискретной многолучевостью.

В [1] был развит метод компенсации амплитудно-фазовых искажений широкополосных (полоса занимаемых частот 1 МГц) КВ радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при обработке принятого сигнала методом сжатия в частотной области на основе использования дисперсионных линий задержки. Величины амплитуды и времени запаздывания в каждой линии задержки задавались на основе оценки амплитуды и фазы передаточной функции радиоканала на частоте, соответствующей частоте этой линии задержки. Недостатком данного метода компенсации является то, что для определения фазы передаточной функции необходимо значительное превышение уровнем сигнала уровня шума [3]. Кроме того, необходимо, чтобы за время между оценкой передаточной функции и обработкой принимаемого сигнала канал оставался стационарным. Компенсации фазовых искажений в коротковолновом радиоканале на основе оценки фазо-частотной характеристики (ФЧХ) радиоканала по ионограммам наклонного зондирования посвящена работа [4]. Однако коррекция ФЧХ

радиоканала – только один из элементов согласованного приема. Кроме этого, в [4] не рассмотрен случай диффузной многолучевости.

Целью данной статьи является разработка методики обработки принятого коротковолнового ЛЧМ сигнала, позволяющей определять параметры радиоканала и адаптировать к ним схему приема.

Принцип зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом. Излучаемый сигнал с линейной частотной модуляцией можно представить в виде:

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \cdot \exp[j\varphi_{\text{изл}}(t)], & t \in [0, T] \\ 0, & t \notin [0, T] \end{cases}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{изл}}(t) = 2\pi f_0 t + 2\pi \dot{f} \cdot t^2$; f_0 – начальная частота; $\dot{f} = df/dt$ – скорость изменения частоты; a_0 – амплитуда сигнала; T – длительность сигнала.

Полоса частот этого сигнала равна $\Delta f = \dot{f} T$, а мгновенная частота в момент времени t равна $f_{\text{изл}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{\text{изл}}(t)}{dt} = f_0 + \dot{f} t$, т. е. частота линейно зависит от времени.

Для многомодового КВ радиоканала сигнал в точке приема можно записать следующим образом:

$$a_{\text{пр}}(t) = \sum_{i=1}^M a_{1i} \cdot \exp[j\varphi_{\text{изл}}(t - \tau_i)], \quad (2)$$

где M – количество принимаемых мод; $a_{1i} = H_i \cdot a_0$ – амплитуда; H_i – коэффициент прохождения; τ_i – время фазового запаздывания сигнала i -й моды.

Обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области состоит в умножении его на сигнал гетеродина приемника, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу, выделении разностного сигнала и в анализе его спектра. Этим операциям с сигналом соответствуют соотношения:

$$A(t) = a_{\text{пр}}(t) \cdot a_{\text{изл}}^*(t), \quad (3)$$

$$S(F) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) \cdot e^{-j2\pi Ft} dt,$$

где $A(t)$ – сигнал разностной частоты; $S(F)$ –

его спектр. Такая обработка является оптимальной при белом шуме и отсутствии искажений в канале.

Из выражений (2) и (3) находим:

$$A(t) = \sum_{i=1}^M a_{2i}(t) \exp[j\varphi_{\text{рази}}(t)], \quad (4)$$

где $a_{2i}(t) = a_{1i}(t) \cdot a_o$; $\varphi_{\text{рази}}(t) = 2\pi(f\tau_i t - \frac{\tau_i^2}{2} f + f_o \tau_i)$.

Если частотной дисперсией на масштабе полосы частот сигнала можно пренебречь ($a_{2i}(t) = \text{const}$ и $\tau_i(t) = \text{const}$), то мгновенная частота разностного сигнала F_i i -й моды не зависит от времени:

$$F_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{\text{рази}}(t)}{dt} = f\tau_i. \quad (5)$$

Следовательно, разностный сигнал i -й моды $a_{\text{рази}}(t) = a_{2i}(t) \exp[j\varphi_{\text{рази}}(t)]$ является гармоническим сигналом с амплитудой a_{2i} и частотой $f_{\text{рази}}$. Спектральный анализ сигнала разностной частоты $A(t)$ производится поэлементно с длительностью элемента T_\varnothing . Тогда, в соответствии с выражением (3), каждой принимаемой моде будет соответствовать своя спектральная составляющая на частоте F_i со спектральной плотностью $a_{2i} \cdot T_\varnothing$ и шириной $1/T_\varnothing$. Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимости времени группового запаздывания $\tau_i(f)$ и амплитуды $a_{2i}(f)$ каждой моды распространения от частоты излучения f .

На рис. 1 приведена ионограмма наклонного зондирования, полученная с помощью ЛЧМ ионозонда на трассе Инскип (Англия) – Йошкар-Ола.

Прямоугольником 1 на этом рисунке выделен участок нижнего луча моды 1F2 с полосой зани-

маемых частот $\Delta f = 300$ кГц для которой можно считать $\tau = \text{const}$, а прямоугольником 2 – участок верхнего луча моды 1F2 с $\Delta f = 600$ кГц для которой $\tau \neq \text{const}$.

Модель диффузного радиоканала. Основной характеристикой радиоканала в частотной области является его передаточная функция. Комплексную передаточную функцию многолучевого ионосферного КВ-радиоканала можно представить в виде:

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^M |H_i(\omega)| \cdot e^{j\varphi_i(\omega)}, \quad (6)$$

где $|H_i(\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi_i(\omega)$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ) i -й моды распространения канала распространения.

В работе [5], исходя из того, что используемые в радиотехнических системах ДКМ-диапазона сигналы занимают полосу частот $\Delta\omega$ много меньше несущей частоты ω_o , предполагают, что $H_i(\omega)$ можно считать постоянной в полосе частот сигнала, а ФЧХ разложить в ряд Тейлора по степеням $\Delta\omega$, ограничившись несколькими слагаемыми:

$$\begin{aligned} |H_i(\omega)| &\approx H_i(\omega_o) = H_{io}, \\ H(\omega) &\approx \sum_{i=1}^m H_{io} \cdot \exp\left[j \cdot \left(\varphi_{io} + \varphi'_i(\omega_o) \cdot \Delta\omega + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 0,5\varphi''_i(\omega_o) \cdot \Delta\omega^2 + \dots \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты разложения в (2) имеют простой физический смысл [5]:

$$\begin{aligned} \varphi'_i(\omega_o) &= \tau_{io}, \quad \varphi''_i(\omega_o) = (\tau'_i)_{\omega} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\tau_i}{df} = (2\pi \cdot \Delta f_{ki})^{-2}, \end{aligned}$$

τ, мс Великобритания (Inskip) [54N3W] - Йошкар-Ола [56.63N47.87E] 2009.03.11 16:56

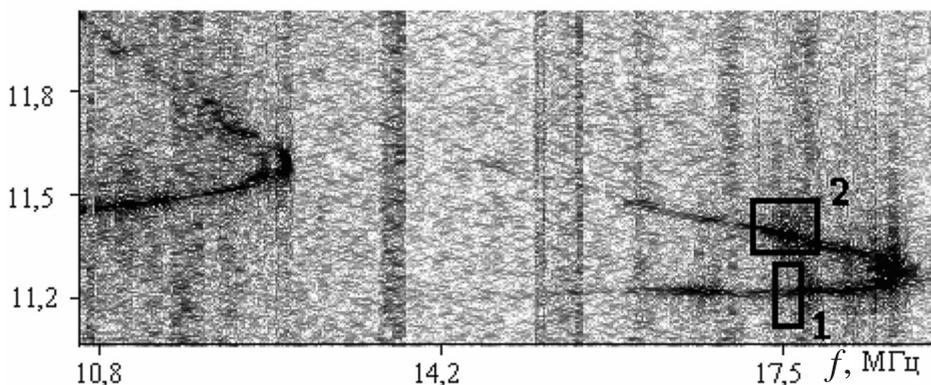


Рис. 1. Ионограмма

где τ_i – время группового запаздывания i -й моды; $\Delta f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{\varphi''}}$ – полоса когерентности радиоканала, т. е. полоса частот, на границах которой набег нелинейной составляющей фазы равен одному радиану [5].

Формула (7) определяет приближение для передаточной функции широкополосного КВ радиоканала. В [1, 4] предполагалась именно такая модель радиоканала.

Если полоса канала меньше полосы когерентности ($\varphi''(\omega_0) = 0$), то для спектра сигнала разностной частоты можно записать:

$$S(\Omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} S_o(\omega) \times S_o^*(w) \sum_{i=1}^m |H_{oi}| \cdot \exp(-j(\varphi_i(\omega_0) + \tau_{oi}(\omega - \omega_0))) \cdot \exp(jt(\omega - w - \Omega)) \cdot dt \cdot dw \cdot d\omega, \quad (8)$$

где $\Omega = 2\pi F$; $S_o(\omega)$ – спектр излучаемого ЛЧМ сигнала $a(t)$.

Учитывая, что $\Delta\omega \gg 2\pi F$ и $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(jxt) \cdot dt = \delta(x)$ (где $\delta(x)$ – дельта-функция), для $S(\Omega)$ получим:

$$S(\Omega) = C \sum_{i=1}^m |H_{oi}| \cdot \exp(-j(\varphi_i(\omega_0) - \frac{(\Omega)^2}{2\pi f})) \times \delta(2\pi f \tau_{oi} - \Omega), \quad (9)$$

где C – некоторая постоянная.

Из этого соотношения видно, что сигнал разностной частоты $A(t)$ представляет собой сумму гармонических сигналов с частотой $F_i = f \tau_{oi}$ и амплитудой $|H_{oi}|$:

$$A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega = C \sum_{i=1}^m |H_{oi}| \times \exp(-j(\varphi_i(\omega_0) - 2\pi f \tau_{oi})) \cdot e^{j(2\pi f \tau_{oi})t}. \quad (10)$$

Так как при обработке КВ радиосигнала с ЛЧМ различия между τ_{oi} невелики, то величину $\frac{(\Omega)^2}{2\pi f}$ можно считать, постоянной.

Следовательно, значения спектральных составляющих разностного сигнала $S(F)$ будут, с точностью до постоянного комплексного множителя, соответствовать значениям передаточной функции на частоте зондирования $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$.

На рисунке 2, а изображен сигнал $A(t)$, соответствующий фрагменту ионограммы, выделенному прямоугольником 1 на рис. 1, а на рис. 2, б – его спектр. Здесь $\Delta f = \frac{f - f_0}{(df/dt)}$, а частота F связана с задержкой τ соотношением $F = \frac{df}{dt} \tau$.

Из рис. 2, а видно, что предположение в выражении (2) о постоянстве АЧХ в полосе коге-

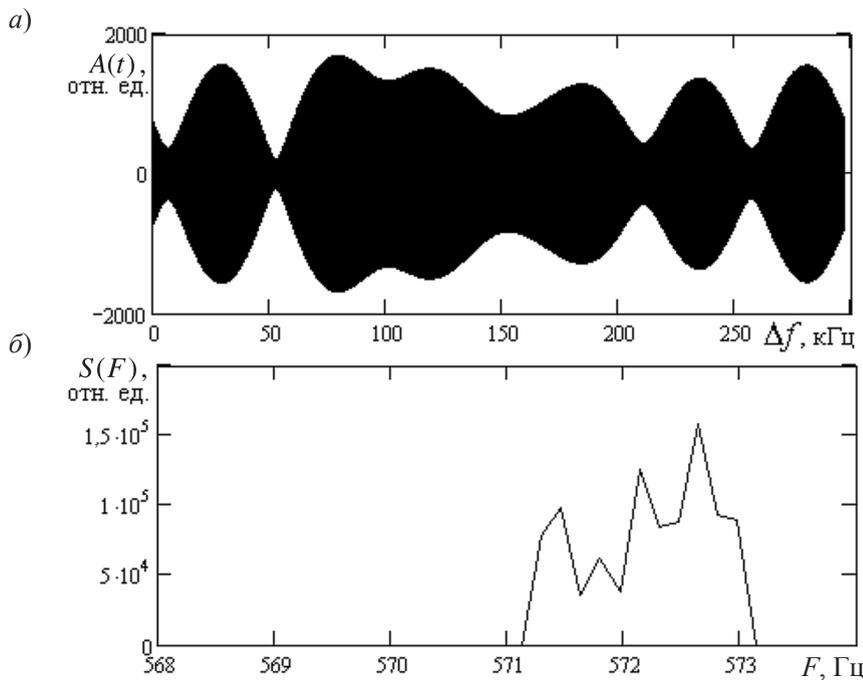


Рис. 2. Сигнал разностной частоты

рентности несправедливо. Даже в одномодовом канале присутствуют частотно-селективные замирания.

Из рис 2, б следует, что одной моде распространения соответствует некоторая совокупность задержек (эффект диффузной многолучевости).

Таким образом, модель (2) плохо описывает представленный широкополосный КВ радиоканал ($|H_i(\omega)| \neq \text{const}$).

В пределах полосы когерентности диффузная многолучевость может быть описана [6] в виде совокупности дискретных составляющих подобно формуле (7):

$$H_i(\omega) = \sum_{n=0}^{N_i-1} H_{ino} \cdot \exp[j \cdot (\varphi_{ino} + \tau_{ino} \cdot \Delta\omega)], \quad (11)$$

где N_i – количество дискретных составляющих i -й моды.

В этом случае сигнал разностной частоты после прохождения одномодового канала с передаточной функцией (11) примет вид:

$$A(t) = \sum_{n=0}^{N-1} C \cdot H_{no} \cdot \cos(\bar{\varphi} + \varphi_{no} + \tau_{no} \cdot 2\pi \frac{df}{dt} \cdot t), \quad (12)$$

где $\bar{\varphi} = -2\pi f \tau_0^2$.

Если предположить равенство амплитуд и начальных фаз дискретных составляющих ($H_{no} = H_0$; $\bar{\varphi} + \varphi_{no} = \varphi_0$) и что шаг между ними по частоте постоянен и равен ΔF , то (6) можно записать как

$$A(t) = C \cdot H_0 \sum_{n=0}^{N-1} \cos(\varphi_0 + 2\pi(\tau_{00} \cdot \frac{df}{dt} + \Delta F \cdot n)t). \quad (13)$$

Переходя к комплексным числам, равенство (13) можно упростить:

$$\begin{aligned} A(t) &= H_0 \sum_{n=0}^{N-1} \cdot \text{Re}(\exp(j(\varphi_0 + 2\pi(\tau_{00} \cdot \frac{df}{dt} + \Delta F \cdot n)t))) = \\ &= H_0 \cos(\varphi_0 + 2\pi(\tau_{00} \cdot \frac{df}{dt} + \frac{\Delta F \cdot (N-1)}{2})t) \times \\ &\quad \times \frac{\sin((2\pi\Delta F \cdot t) \cdot \frac{M}{2})}{\sin(\frac{2\pi\Delta F \cdot t}{2})}. \end{aligned} \quad (14)$$

Множитель $\frac{\sin((2\pi\Delta F \cdot t) \cdot \frac{M}{2})}{\sin(\frac{2\pi\Delta F \cdot t}{2})}$ определяет пе-

риодические колебания амплитуды, аналогичные тем, что изображены на рис 2, а.

Таким образом, модель (11) более адекватно описывает передаточную функцию широкополосного КВ радиоканала.

Методика квазиоптимальной обработки.

Для того, чтобы обработка (3) стала оптимальной при наличии небелого шума и канала с диффузной многолучевостью, необходима реализация дополнительного фильтра с передаточной функцией $\frac{H^*(\omega)}{W(\omega)}$, где $W(\omega)$ – спектральная плотность шума. Это требует разделения сигнала и шума и измерение их характеристик.

Предлагается выделение принимаемых мод в разностном сигнале проводить с помощью полосовых фильтров, согласованных с сигналами соответствующих мод. Непрерывный ЛЧМ сигнал при обработке разбивается на элементы. Если длительность элемента сигнала T_3 , то полоса каждого фильтра равна $\frac{1}{T_3}$. Разностные сигналы соответствующих мод $a_{\text{раз}}(t)$ являются квазигармоническими, а шумовые сигналы $A_{\text{ш}}(t)$ занимают всю полосу частот. Был разработан оригинальный адаптивный алгоритм фильтрации разностного сигнала [7].

Разностные сигналы i -х мод $a_{\text{раз}}(t)$, проходящие через соответствующий частотный фильтр Φ_i ($i=1, 2, \dots, M$), после суммирования дают сигнал разностной частоты $A(t)$. Сигналы с остальных фильтров также складываются. Суммарный сигнал восстанавливает сигнал помехи $A_{\text{ш}}(t)$.

Необходимо отметить, что в [1] для оценки спектральной плотности шума использовался дополнительный прибор – спектральный монитор, что усложняло измерительные процедуры.

Для построения зависимости $H^*(\omega)$ предлагается широкополосный ЛЧМ сигнал с полосой Δf и длительностью T разбить на K элементов с полосой Δf_3 и длительностью T_3 . Как следует из (9) набор спектральных отсчетов k -го элемента разностного сигнала ($k = 1, 2, \dots, K$) соответствует значениям передаточной функции на частоте $f_k = f_0 + \Delta f_3 (k - 1)$. Выполняя комплексное сопряжение, получаем оценку $H^*(2\pi f_k)$.

Для определения средней мощности шума $A_{\text{ш}}(t)$ в полосе частот приемника $\Delta F_{\text{пр}}$ производится интегрирование квадрата этого сигнала за время нахождения сигнала разностной частоты $A(t)$ в полосе частот приемника $t \in \left[t - \frac{T_a}{2}; t + \frac{T_a}{2} \right]$:

$$P_{\text{ш}}(t) = \frac{1}{T_a} \int_{t - \frac{T_a}{2}}^{t + \frac{T_a}{2}} A_{\text{ш}}^2(t) dt, \quad \text{где } T_a = \frac{\Delta F_{\text{пр}}}{f}.$$

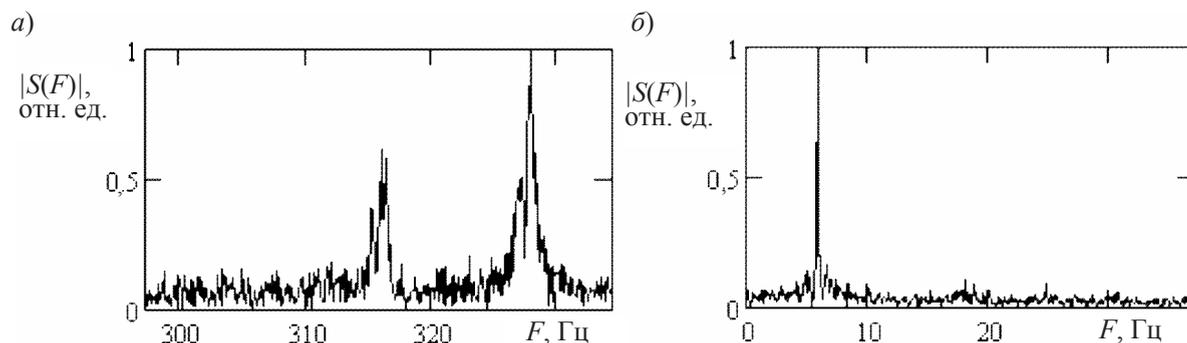


Рис. 3. Модули спектров разностных сигналов

Отсчеты $W(\omega)$ находятся как $W(2\pi(f_0 + f \cdot t)) = \sqrt{P_{ш}(t)}$.

Полученные значения $H^*(2\pi f_k)$ и $W(\omega)$ позволяют построить фильтр, согласованный с принимаемым сигналом (дискретность измерений делает такой фильтр квазиоптимальным).

На рис. 3 изображены модули спектров разностного сигнала, соответствующего прямоугольнику 2 на рис. 1. На рис. 3, а изображен исходный модуль спектра, а на рис. 3, б – после применения процедуры оптимальной фильтрации. При реализации процедуры фильтрации разностный сигнал, соответствующий ЛЧМ сигналу с полосой 600 кГц, разбивался на 64 элемента с соответствующей полосой 9375 Гц. Полоса частот на выходе приемника была равна $\Delta F_{пр} = 2,4$ кГц.

Выигрыш в отношении сигнал/шум благодаря использованию предложенной методики для этого примера равен 11 дБ. Вклад процедуры «обеления» шума (фильтр $\frac{1}{W(\omega)}$) составил 1,3 дБ.

С помощью непрерывного ЛЧМ сигнала возможно определение комплексной передаточной функции широкополосного КВ радиоканала с диффузной многолучевостью. Фильтрация разностного сигнала дает возможность выделить шумовую составляющую и оценить спектральную плотность шума в широкой полосе частот.

Предложенные методики можно использовать при передаче информации в КВ радиоканале сигналами с ЛЧМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dhar, S.** Equalized megahertz bandwidth HF channels for spread spectrum communications [Текст]/S. Dhar, B.D. Perry//MiLCOM'82.–1982.–Р. 29.5.1–29.5.5.
2. **Иванов, В.А.** Определение передаточной функции широкополосного КВ-радиоканала для отдельных мод распространения [Текст]/В.А. Иванов, А.А. Колчев, В.В. Шумаев//Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн: межвед. сб.–М.: МФТИ, 1995.–С. 122–131.
3. **Poole, A.W.V.** Advanced sounding. The FMCW alternative [Текст]/A.W.V. Poole//Radio Science.–1985.–Vol. 20. № 6.–Р. 1609–1616.
4. **Иванов, В.А.** Коррекция широкополосных коротковолновых ионосферных радиоканалов [Текст]/В.А. Иванов, Д.В. Иванов, А.А. Колчев//Радиотехника

- и электроника.–2003.–Т. 48.–№ 6.–С. 688–697.
5. **Иванов, В.А.** Исследование искажений сигналов с расширенным спектром на выходе сквозного радиоканала с дисперсией [Текст]/В.А. Иванов, А.А. Колчев, Н.В. Рябова [и др.]//Проблемы дифракции и распространения волн: межвед. сб.–М.: МФТИ, 1994.–С. 62–72.
6. **Семенов, А.М.** Широкополосная радиосвязь [Текст]/А.М. Семенов, А.А. Сикарев. –М.: Воениздат, 1970.–С. 280.
7. **Колчев, А.А.** Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ ионозонда [Текст]/А.А. Колчев, А.О. Щирий//Оптика атмосферы и океана.–2007.–№ 7.–С. 627–630.

СИНТЕЗ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Последовательные регуляторы (ПР) широко применяются в микропроцессорных САУ различного назначения. По сравнению с модальными регуляторами (МР) они проще в реализации, т. к. не требуют наблюдения вектора состояния объекта управления (ОУ).

Синтез цифровых ПР обычно проводится алгебраическим методом размещения полюсов по дискретной линеаризованной модели САУ [1, 3, 6–8]. При этом для систем с ОУ m -го порядка структура регулятора задается передаточной функцией:

$$D(z) = G(z) / H(z), \quad (1)$$

где $G(z) = \sum_{i=1}^m g_i z^{i-1}$, $H(z) = z^{m-1} + \sum_{i=1}^{m-1} h_i z^{i-1}$ – полиномы $(m - 1)$ -й степени.

Получаемые при синтезе параметры (g_i , h_i) часто не обеспечивают желаемых показателей качества переходных процессов в замкнутой САУ из-за их зависимости не только от полюсов, но и от нулей системы. Поэтому на практике синтез повторяется многократно методом «проб и ошибок». Рациональнее осуществлять оптимизацию параметров итерационными методами по интегральным или другим критериям.

При $m \geq 3$ число параметров регулятора $(2m - 1)$ достаточно велико, а их значения требуется варьировать в широких диапазонах, поэтому целесообразнее оптимизацию проводить не в пространстве непосредственно параметров регулятора, а в пространстве полюсов, совмещая ее с процедурами синтеза и анализа динамики САУ. При этом оценивание значений критерия в процессе оптимизации следует осуществлять по нелинейной дискретно-непрерывной модели САУ, учитывающей ограничения, присущие реальной системе.

Рассмотрим основные процедуры синтеза цифровых ПР (рис. 1).

Алгебраический синтез методом размещения полюсов

На *первом этапе* осуществляется дискретизация непрерывной векторно-матричной модели

ОУ с заданным периодом дискретности T_0 :

$$\begin{aligned} X[n+1] &= A_d X[n] + B_d u[n]; \\ y[n] &= C_d^T X[n] \end{aligned} \quad (2)$$

где X – m -вектор состояния ОУ; $y[n]$ – выходная координата системы; $A_d = e^{A_X T_0}$ – матричная экспонента; $B_d = (\int_0^{T_0} e^{A_X \tau} d\tau) B_u$; $C_d^T = C_X^T$; A_X – $m \times m$ -матрица, B_u и C_X – m -векторы непрерывной модели ОУ.

Дискретную модель (2), имеющую произвольную форму, необходимо затем преобразовать к канонической форме управляемости, которой соответствует дискретная передаточная функция ОУ:

$$W(z) = B(z) / A(z), \quad (3)$$

где $A(z) = z^m + \sum_{i=1}^m a_i z^{i-1}$, $B(z) = \sum_{i=1}^m b_i z^{i-1}$ – полиномы m -й и $(m - 1)$ -й степени соответственно.

На *втором этапе* выбирается эталонный характеристический полином $(2m - 1)$ -й степени для замкнутой дискретной САУ с желаемым размещением полюсов внутри круга единичного

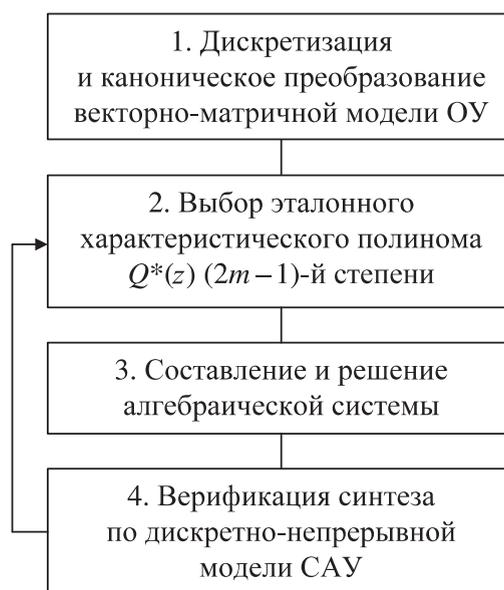


Рис. 1. Этапы синтеза

радиуса на комплексной Z -плоскости. Можно задавать полиномы следующих видов.

Для достижения минимального времени переходного процесса в системе, равного $(2m - 1)$ тактов, выбирается полином с нулевыми полюсами и коэффициентами:

$$Q_{2m-1}^*(z) = z^{2m-1}. \quad (4)$$

Но переходный процесс при этом будет сильно колебательным с большими значениями управляющего воздействия $u[n]$.

Для получения более медленного переходного процесса с меньшими значениями $u[n]$ можно задавать $(m - 1)$ нулевых и m ненулевых полюсов, используя полином вида

$$Q_{2m-1}^*(z) = z^{m-1} Q_m^*(z), \quad (5)$$

в котором требуется задавать полюса и по ним вычислять коэффициенты полинома m -го порядка $Q_m^*(z) = z^m + \sum_{i=1}^m a_i^* z^{i-1}$.

При задании вещественных $|\gamma_i^*| < 1$ и комплексно-сопряженных полюсов $|\gamma_i^*| = |\text{Re}\gamma_i^* \pm j\text{Im}\gamma_i^*| < 1$ эталонный полином имеет общую форму

$$Q_{2m-1}^*(z) = z^{2m-1} + \sum_{i=1}^{2m-1} a_i^* z^{i-1}. \quad (6)$$

На *третьем этапе* из условия равенства коэффициентов характеристических полиномов

$$B(z)G(z) + A(z)H(z) = Q_{2m-1}^*(z)$$

составляется система линейных алгебраических уравнений $(2m - 1)$ -го порядка относительно искоемых параметров регулятора, которая в блочном представлении имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} B_{m \times m} & A_{m \times (m-1)} \\ B_{(m-1) \times m} & A_{(m-1) \times (m-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_I^* \\ a_{II}^* - a \end{bmatrix} \quad (7)$$

где элементами матричных блоков в левой части являются коэффициенты полиномов $B(z)$ и $A(z)$ (параметры канонической модели ОУ); $g = (g_1, \dots, g_m)^T$; $h = (h_1, \dots, h_{m-1})^T$ – векторы параметров регулятора; $a_I^* = (a_1^*, \dots, a_{m-1}^*)^T$ и $a_{II}^* = (a_m^*, \dots, a_{2m-1}^*)^T$ – векторы коэффициентов эталонного полинома; $a = (a_1, \dots, a_m)^T$ – вектор коэффициентов $A(z)$.

Чтобы решение системы (7) было единственным, ее матрица должна быть квадратной $(2m - 1) \times (2m - 1)$ и неособенной. Для этого порядок регулятора (1) должен согласовываться с порядком ОУ, который должен быть управляемым.

На *четвертом этапе* проводится проверка результатов синтеза путем компьютерного анализа динамики замкнутой САУ. При этом анализируется ее робастность, т. е. способность сохранять устойчивость и приемлемые показатели качества при вариациях параметров ОУ. Кроме того, проверяется отсутствие скрытых колебаний внутри интервалов квантования по времени, а также исследуется влияние квантования цифровых сигналов по уровню временного запаздывания и ограничения управляющего воздействия. При неудовлетворительных результатах осуществляется возврат ко второму этапу, где проводится корректировка размещения полюсов в круге единичного радиуса на Z -плоскости и пересчет коэффициентов эталонного характеристического полинома.

Итерационная оптимизация, совмещенная с синтезом

На схеме такой оптимизации (рис. 2) процедуры синтеза и анализа динамики САУ вложены в общий цикл итерационного процесса оптимизации по выбранному критерию. При этом компьютерный синтез осуществляется не методом «проб и ошибок», а целенаправленным образом. При анализе динамики САУ в ее модели учитывается ограничение на значения выхода регулятора $|u[n]| \leq U_{\max}$.

На практике рекомендуется использовать интегральный критерий следующего вида:

$$J(e, X) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (e^2[n] + c(\nabla e[n]/T_0)^2 + ru^2[n]), \quad (8)$$

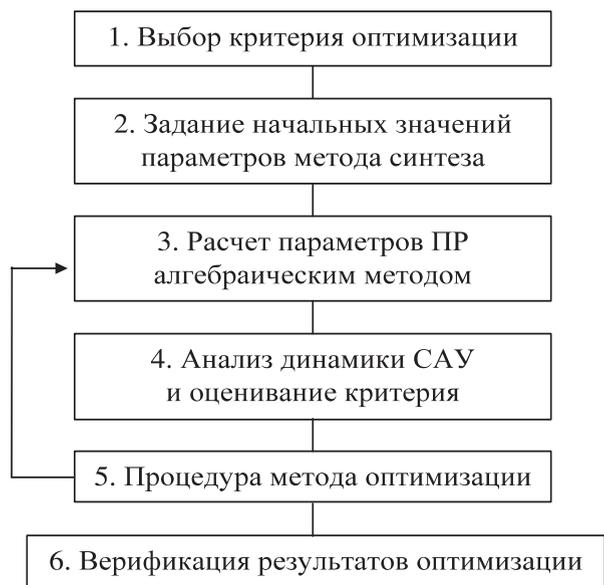


Рис. 2. Схема оптимизации, совмещенной с синтезом

где $e[n] = g[n] - y[n]$ – ошибка между ступенчатым входным воздействием и выходом системы; $\nabla e[n] = e[n] - e[n - 1]$ – конечная разность ошибки; $u[n]$ – управляющее воздействие; (c, r) – весовые коэффициенты.

Критерий (8) можно оценивать (вычислять) при любом характере переходного процесса в нелинейной модели САУ. Однако выбор весовых коэффициентов субъективен, поэтому при неправильном их задании получаемые настройки параметров регулятора будут не оптимальными с технической точки зрения. Например, экстремаль (переходная характеристика $e_{ext}[n]$) критерия, соответствующая его минимуму, может иметь большое перерегулирование. Для его снижения или полного исключения следует увеличивать значения весовых коэффициентов (c, r) .

Чувствительность динамики САУ к непосредственным вариациям параметров регулятора процедурой применяемого метода оптимизации обычно оказывается высокой, а устойчивость не гарантируется. Чувствительность же динамики и критерия к вариациям полюсов (параметров метода синтеза) ниже, т. к. совмещенный синтез регуляризирует итерационный процесс оптимизации. При этом на варьируемые полюса можно накладывать прямые ограничения по устойчивости САУ и другим условиям. Например, можно проводить оптимизацию в пространстве только вещественных полюсов внутри круга единичного радиуса на комплексной Z -плоскости.

Полные затраты на компьютерную оптимизацию по схеме (рис. 2) зависят от размерности пространства оптимизируемых параметров, используемого метода минимизации интегрального критерия и сложности совмещенных с оптимизацией процедур синтеза и анализа САУ. Количество варьируемых полюсов равно $(2m - 1)$, но при выборе эталонного полинома вида (5) оно может быть сокращено до m .

Оптимизация с синтезом на основе структурных преобразований

С точки зрения снижения размерности пространства варьируемых полюсов, особенно при высоком порядке ОУ, представляют интерес следующие два способа синтеза ПР, совмещенного с оптимизацией, основанные на предварительном расчете параметров МР и последующем их пересчете для САУ с последовательной структурой регулятора.

Первый способ, предложенный в [5], позволяет по m -вектор-строке K^T параметров цифрового МР без наблюдателя вычислять $(2m - 1)$ параметров последовательного регулятора $(m - 1)$ -го порядка вида (1) с помощью следующих выражений:

$$g^T = K^T(A^{m-1}R_{AC}^{-1}); h^T = K^TR_{AB} - g^TR_{ABC}, \quad (9)$$

где

$$R_{AC} = \begin{pmatrix} C^T \\ C^T A \\ \dots \\ C^T A^{m-1} \end{pmatrix} - m \times m \text{ матрица наблюдаемости;}$$

$$R_{AB} = (A^{m-2}B \dots AB \ B) - m \times (m - 1) \text{ матрица;}$$

$$R_{ABC} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ C^T B & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C^T A^{m-2} B & C^T A^{m-3} B & \dots & C^T B \end{pmatrix} - m \times (m - 1) \text{ матрица.}$$

Выражения (9) получены из условия соответствия управляющих воздействий в САУ с последовательным и модальным регуляторами:

$$u[n] = g^TE[n] - h^TU[n] = -K^TX[n],$$

где $E[n] = (e[n - m + 1], \dots, e[n])^T - m$ -вектор ошибки системы; $U[n] = (u[n - m + 1], \dots, u[n - 1])^T - (m - 1)$ -вектор управления в дискретные моменты времени. Если при составлении выражений для векторов $E[n]$, $U[n]$ и $X[n]$ использовать дискретную каноническую модель ОУ в форме управляемости, то ее следует применять и при предварительном расчете K^T , а также в формулах (9).

Данный способ синтеза цифровых ПР не требует явного решения алгебраической системы (7) и оперирует с матрицами меньшей размерности, вычисляемыми однократно, поэтому для оптимизации с совмещенным синтезом он эффективен. При этом получаемые им результаты совпадают с результатами синтеза непосредственно на основе решения системы (7), когда эталонный полином задается в виде (5).

Второй способ, описанный в [7, 8], позволяет по $2m$ -параметрам (L, K^T) цифрового МР с наблюдателем определять коэффициенты передаточной функции соответствующего, но не эквивалентного, последовательного регулятора m -го порядка:

$$D(z) = -\frac{U(z)}{Y(z)} = K^T(zE - A_d + B_d K^T + LC_d^T)^{-1}L, \quad (10)$$

где m -вектор-столбец L и m -вектор-строка K^T обратных связей наблюдателя и МР предварительно вычисляются методом размещения полюсов.

Однако при включении рассчитанного этим способом ПР в прямую цепь замкнутой САУ может возникать большое перерегулирование. При включении ПР в цепь обратной связи, что не всегда приемлемо на практике, перерегулирование снижается. Но для его полного устранения требуется параметрическая оптимизация.

Если при оптимизации ПР с совмещенным синтезом на основе второго способа значения вектора L не варьируются, то ее можно осуществлять в пространстве только m параметров – полюсов замкнутой САУ с МР.

Примеры синтеза и оптимизации

Пример 1. Проведем оптимизацию цифрового ПР в 5-мерном пространстве полюсов следящей системы с ОУ 3-го порядка:

$$W(s) = \frac{K}{(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)s},$$

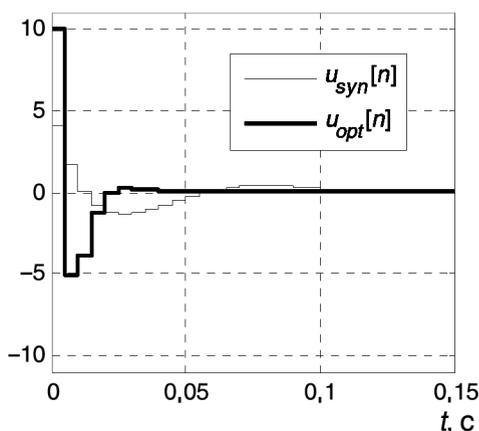
где $K = 50$, $T = 0,05$ с, $\xi = 0,707$. Период дискретности зададим $T_0 = 0,005$ с, ограничение выхода регулятора $U_{\max} = 10$.

После дискретизации и канонического преобразования получим следующие параметры модели ОУ:

$$a_1 = -0,8681; a_2 = 2,7270; a_3 = -2,8588; \\ b_1 = 3,7469E - 4; b_2 = 0,0016; b_3 = 4,0215E - 4.$$

Для замкнутой системы с регулятором 2-го порядка

$$D(z) = \frac{g_3 z^2 + g_2 z + g_1}{z^2 + h_2 z + h_1}$$



выберем эталонный полином вида (5) с одним вещественным и двумя парами комплексных полюсов

$$\gamma_1^* = 0,75; \gamma_{2,3}^* = 0,8 \pm j0,1; \gamma_{4,5}^* = 0,85 \pm j0,2.$$

Матричные блоки алгебраической системы вида (7) составим по параметрам канонической дискретной модели ОУ, а правая часть примет вид:

$$\begin{bmatrix} a_1^* \\ a_{II}^* - a \end{bmatrix} = [a_1^*, a_2^*, a_3^* - a_1, a_4^* - a_2, a_5^* - a_3]^T.$$

Решив систему, получим значения параметров регулятора

$$g_1 = 16,1502; g_2 = -35,9814; g_3 = 20,1666; \\ h_1 = 0,4351; h_2 = -1,1993,$$

обеспечивающие в дискретно-непрерывной системе при ступенчатом входном воздействии $g[n] = 0,2$ переходный процесс с большим перерегулированием (кривая $y_{syn}(t)$ на рис. 3), которое вызвано влиянием нулей передаточной функции замкнутой системы:

$$W_{зам}(z) = \frac{B(z)G(z)}{B(z)G(z) + A(z)H(z)}.$$

Для его исключения осуществим оптимизацию по критерию (8) с совмещенным синтезом, принимая в качестве пяти оптимизируемых параметров вещественные и мнимые части полюсов

$$P = [p1; p2 + p3*j; p2 - p3*j; p4 + p5*j; p4 - p5*j].$$

Задав весовые коэффициенты ($c = 0,5E - 3$; $r = 1,0E - 3$), после оптимизации получим параметры ПР, обеспечивающие переходный процесс без перерегулирования (кривая $y_{opt}(t)$ на рис. 3).

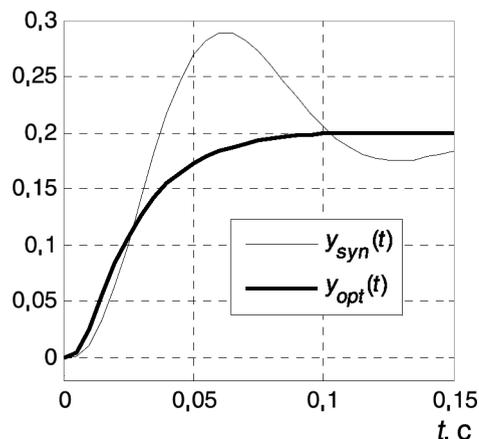


Рис. 3. Результаты оптимизации в пространстве пяти полюсов

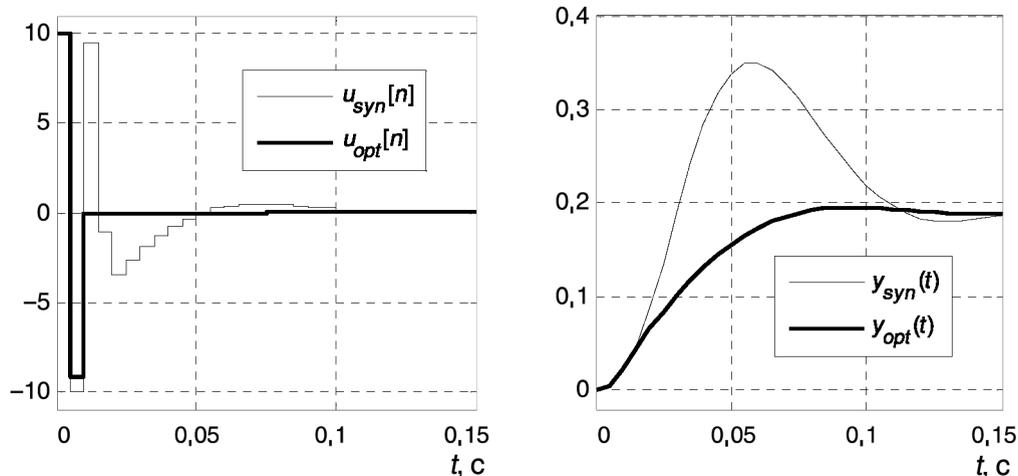


Рис. 4. Результаты оптимизации в пространстве трех полюсов (первый способ)

Пример 2. Оптимизируем параметры цифрового ПР регулятора 2-го порядка из примера 1, задавая при предварительном синтезе МР эталонный полином с тремя полюсами

$$\gamma_1^* = 0,75; \gamma_{2,3}^* = 0,85 \pm j0,2.$$

По методикам, описанным в [2, 4, 9], либо с помощью функции *acker* пакета MATLAB вычислим вектор параметров МР

$$K^T = [6,7079 \quad -0,2412 \quad 0,0037].$$

По выражениям (9) находим следующие значения параметров ПР:

$$g_1 = 151,8836; g_2 = -350,4421; g_3 = 205,2664; \\ h_1 = 0,0656; h_2 = 0,3263,$$

при которых переходный процесс имеет большое перерегулирование (кривая $y_{syn}(t)$ на рис. 4). Осущ-

ествив оптимизацию в пространстве трех полюсов по критерию (8) с совмещенным синтезом по формулам (9), получим параметры ПР, обеспечивающие переходный процесс без перерегулирования (кривая $y_{opt}(t)$ на рис. 4).

Пример 3. Для системы с ОУ из примера 1 функцией *acker* рассчитаем предварительно параметры цифрового наблюдателя и МР, а затем, используя (10) с помощью функции *ss2tf* определим параметры цифрового ПР 3-го порядка:

$$D(z) = \frac{g_3 z^2 + g_2 z + g_1}{z^3 + h_3 z^2 + h_2 z + h_1},$$

где

$$g_1 = 173,0863; g_2 = -396,7341; g_3 = 230,4027; \\ h_1 = 0,0661; h_2 = 0,5544; h_3 = 0,1588.$$

Переходный процесс в системе с синтезированным ПР (кривая $y_{syn}(t)$ на рис. 5) имеет перере-

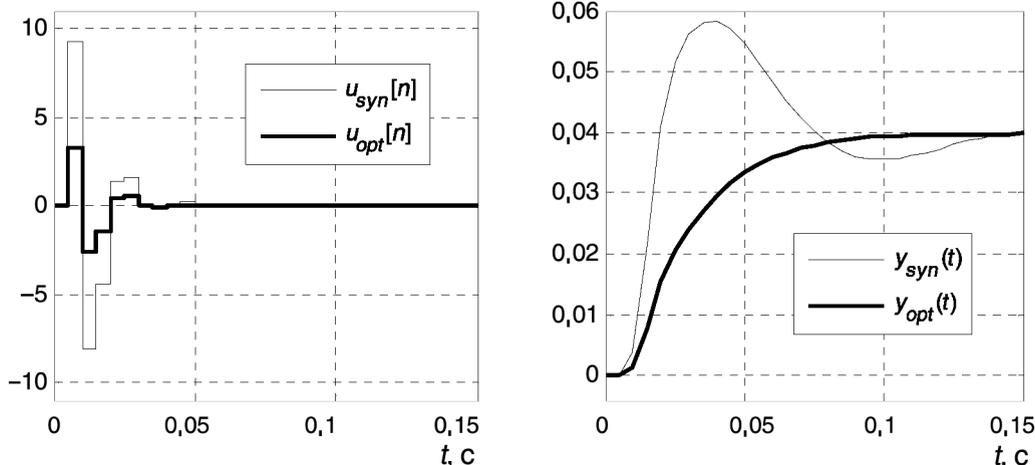


Рис. 5. Результаты оптимизации в пространстве трех полюсов (второй способ)

гулирование, хотя в системе с МР оно отсутствовало. Осуществив оптимизацию ПР по критерию (8) в пространстве трех полюсов системы с МР и совмещенным синтезом на основе преобразования (10), получим переходный процесс без пере-регулирования (кривая $y_{opt}(t)$ на рис. 5).

Оптимизация ПР высокого порядка непосредственно в $(2m - 1)$ -пространстве параметров неэффективна по затратам времени и не гарантирует обеспечение устойчивости. Процесс оптимизации в пространстве полюсов регуляризуется процедурой используемого алгебраического метода синтеза. В общем случае размерность этого пространства (параметров метода синтеза) равна

количеству параметров регулятора $(2m - 1)$, а при синтезе на основе структурных преобразований может быть снижена до m .

Предложенная методика оптимизации с тремя различными вариантами процедур совмещенного синтеза позволяет осуществлять компьютерную настройку параметров ПР целенаправленно и эффективно. При этом в процессе оптимизации для оценивания критерия следует использовать нелинейную модель динамики САУ, учитывающую ограничение выхода регулятора и другие нелинейности.

Параметрическая оптимизация аналоговых ПР с совмещенным алгебраическим синтезом проводится аналогичным образом [2, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления [Текст]/Р. Изерман; пер. с англ.—М.: Мир, 1984.
2. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления. Компьютерные технологии: учеб. пособ. [Текст]/В.Н. Козлов, Н.В. Ростов.—СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
3. **Куо, Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст]/Б. Куо; пер. с англ.—М.: Машиностроение, 1986.
4. **Ростов, Н.В.** Компьютерные технологии в науке. Синтез и оптимизация: учеб. пособ. [Текст]/Н.В. Ростов.—СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
5. **Ростов, Н.В.** Синтез и автоматизация проектирования электромеханических исполнительных систем автоматических манипуляторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. [Текст]/Н.В. Ростов.—Л.: ЛПИ, 1986.
6. **Franklin, G.F.** Feedback Control of Dynamic Systems: [Текст]/G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini; 4 ed//Upper Saddle River.—Prentice Hall, 2002.
7. **Ogata, K.** Discrete-Time Control Systems [Текст]/K. Ogata; 2 ed//Upper Saddle River.—Prentice Hall, 1995.
8. **Ogata, K.** Modern Control Engineering [Текст]/K. Ogata; 4 ed//Upper Saddle River.—Prentice Hall, 2002.
9. **Rostov, N.V.** Computer-Aided Design of Digital Control Systems [Текст]/N.V. Rostov, S. Chae, Y.S. Oh.—SPbSTU Publishing Center, 2001.

УДК 621.37

Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, В.Г. Манжула

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ SiGe-ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С НИЗКОВОЛЬТНЫМ ПИТАНИЕМ

Внедряемый российскими предприятиями для производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) нового поколения SiGe технологический процесс SGB25VD не допускает построения схем с р-п-р транзисторами, используемых в классиче-

ских схемотехнических решениях активных нагрузок в виде токовых зеркал [1–3]. Это не позволяет применять традиционные активные нагрузки в ОУ СВЧ диапазона. Как следствие, в качестве элементов коллекторной цепи входного каскада

ОУ разрешается использовать только пассивные элементы – резисторы. В конечном итоге данное требование ограничивает K_y входного дифференциального каскада и ОУ в целом.

Рассматриваемое ниже схемотехническое решение позволяет повысить в 8–20 раз коэффициент усиления по напряжению K_y при выполнении цепи коллекторной нагрузки входного каскада в виде сравнительно низкоомных (600–800 Ом) резисторов, расширить частотный диапазон и уменьшить э.д.с. смещения нуля ($U_{см}$).

Схема предлагаемого ОУ приведена на рис. 1. В статическом режиме коллекторные токи ($I_{к1}$) транзисторов VT1, VT2 и VT3 устанавливаются источниками тока I_1 и I_2 :

$$I_{к1} = I_{к2} = I_{к3} = I_0, \quad (1)$$

где $I_0 = I_2 = I_1/2$.

Через резисторы нагрузки R1 и R2 протекают статические токи, равные $2I_0$.

Если на вход Вх.⁽⁺⁾1 подается напряжение $u_{вх}$, то это вызывает увеличение коллекторного тока

транзистора VT1 и уменьшение коллекторного тока транзистора VT2.

Как следствие, напряжение на токовом выходе 2 увеличивается. При этом приращение u_2 передается на выход ОУ, а затем через общий эмиттерный выход токового зеркала ПТ1 в узел 1. Следует обратить внимание на то, что в предлагаемой схеме вследствие ее структурных особенностей обеспечивается равенство переменных напряжений:

$$u_{б3} \approx u_{вых} = u_1. \quad (2)$$

Изменение u_1 приводит к изменению тока i_1 через эквивалентное сопротивление $r_{экр.1}$ в цепи первого токового выхода 1 входного дифференциального каскада ДК1:

$$i_1 = \frac{u_1}{r_{экр.1}}, \quad (3)$$

где $r_{экр.1} = R_1 \parallel R_{вых.1} \parallel R_{вх.пт1}$ – эквивалентное сопротивление в узле 1; $R_{вых.1}$ – выходное сопротивление входного дифференциального каскада ДК1 по первому (1) токовому выходу; $R_{вх.пт1} \approx \infty$ –

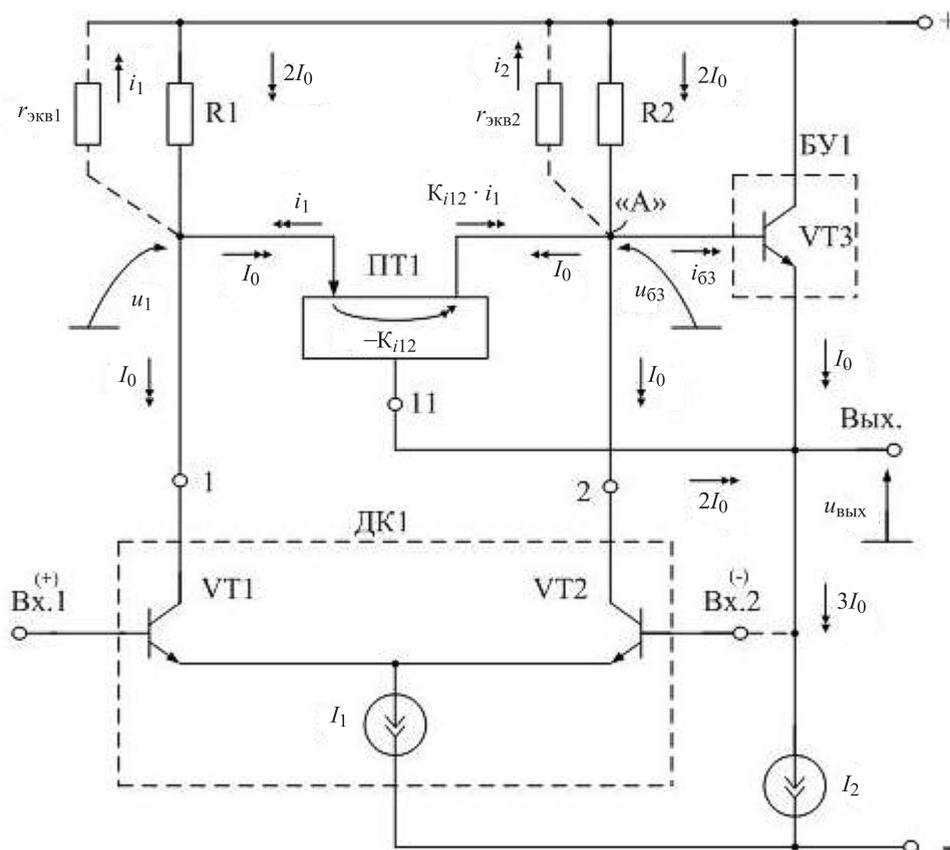


Рис. 1. Операционный усилитель с цепью взаимной компенсации резисторов коллекторной нагрузки R1 и R2

эффективное входное сопротивление токового зеркала ПТ1.

Причем

$$R_{\text{вых.1}} \approx (r_{\text{э.1}} + r_{\text{э.2}}) \mu_1^{-1}, \quad (3)$$

где $r_{\text{э.1}} = r_{\text{э.2}} = 2\varphi_{\text{T}}/I_1$ – сопротивления эмиттерных переходов транзисторов VT1, VT2; $\mu \approx 10^{-3}$ – коэффициент внутренней обратной связи транзистора VT1.

Приращение тока i_1 поступает на вход токового зеркала ПТ1 и далее на его выход – в цепь второго (1) токового выхода входного дифференциального каскада ДК1.

Поэтому в узле «А» происходит взаимная компенсация тока i_2 через $r_{\text{э.кв.2}}$ током i_1 через $r_{\text{э.кв.1}}$. При этом разностный ток в узле «А»:

$$i_p = i_2 + i_{\text{б.3}} - K_{i12}i_1 = u_2 \left(\frac{1}{r_{\text{э.кв.2}}} - \frac{K_{i12}}{r_{\text{э.кв.1}}} \right) + \frac{u_2}{r_{\text{вх.БУ}}}, \quad (5)$$

где K_{i12} – коэффициент передачи по току токового зеркала ПТ1; $r_{\text{э.кв.2}}$ – эквивалентное сопротивление в узле «А»; $r_{\text{вх.БУ}}$ – входное сопротивление буферного усилителя БУ1.

Если в частном случае выбрать $r_{\text{э.кв.1}} = r_{\text{э.кв.2}}$ и $K_{i12} = 1$, то эквивалентное сопротивление в узле «А» ($R_{2\text{-э.кв}}$), влияющее на K_y , не зависит от R1, R2 и будет определяться сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$, приведенным к базе транзистора VT3.

Поэтому коэффициент усиления по напряжению предлагаемой схемы слабо зависит от абсолютных величин сопротивлений резисторов R1 и R2, которые могут быть достаточно низкоомными:

$$K_{y,\text{max}} \approx \frac{r_{\text{вх.БУ}}}{r_{\text{э.1}} + r_{\text{э.2}}} \approx \frac{\beta_{\text{БУ}} R_{\text{н}}}{2r_3}, \quad (6)$$

где $r_3 = \varphi_{\text{T}}/I_{\text{эi}}$ – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода i -го транзистора; $\varphi_{\text{T}} = 25$ мВ – температурный потенциал; $I_{\text{эi}}$ – статический ток эмиттера транзисторов VT1 и VT2.

Таким образом, в схеме на рис. 1 на один-два порядка уменьшается влияние сопротивлений резисторов нагрузки R1 = R2 на коэффициент усиления K_y по напряжению ОУ, при этом максимальный коэффициент усиления по напряжению $K_{y,\text{max}}$ схемы определяется свойствами нагрузки $R_{\text{н}}$, подключаемой к выходу. Входные и выходные импедансы токового зеркала ПТ1 практически не влияют на K_y , т. к. токи через них не изменяются в связи с тем, что $u_1 = u_2 = u_{\text{вых}}$.

В результате в предлагаемой архитектуре ОУ улучшается более чем на порядок $K_{y,\text{max}}$, причем

это обеспечивается при использовании низкоомных резисторов в качестве нагрузки R1 и R2 (например: $R_1 = R_2 = 700$ Ом), а также при низковольтном напряжении питания (± 2 В).

Дальнейшее развитие схемы показано на рис. 2.

Ее особенность – расширение полосы частот (улучшение частотных характеристик $K_y = \varphi(f)$) за счет введения конденсатора C3, емкость которого рассчитывается по формуле:

$$C_3 \approx C_{\Sigma 2} - C_{\Sigma 1}, \quad (7)$$

где $C_{\Sigma 2} > C_{\Sigma 1}$ – суммарная емкость в цепи второго (2) токового выхода входного дифференциального каскада ДК1; $C_{\Sigma 1}$ – суммарная емкость в цепи первого (1) токового выхода входного дифференциального каскада ДК1.

Как уже отмечалось, основная особенность схем рис. 1 и рис. 2 – равенство напряжений в узлах 1, 2 и на выходе:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_{\text{вых}}, \quad (8)$$

где \dot{U}_i – комплекс напряжений в i -м узле схемы.

Как следствие, переменная составляющая тока через емкость $C_{1\Sigma} < C_{2\Sigma}$ компенсирует переменную составляющую тока через емкость $C_{2\Sigma}$. Однако эта компенсации без введения конденсатора C3 будет неполной, т. к. $C_{2\Sigma}$ складывается не только из емкости резистора R2 (C_R), емкости на подложку C_2 транзистора VT2, выходной емкости токового зеркала ПТ1 ($C_4 \approx 0$), но и емкости $C_{\text{кб.3}}$ транзистора VT3, а также емкости нагрузки $C_{\text{н}}$, пересчитанной в цепь базы транзистора VT4 в виде $C_{\text{н}}^*$. Таким образом, без конденсатора C3 выполняется неравенство:

$$C_{1\Sigma} < C_{2\Sigma}. \quad (9)$$

Поэтому «искусственное» увеличение эквивалентной емкости в узле 1 создает условия для расширения полосы частот ДУ более чем в 4–5 раз. В результате введения конденсатора C3 в схеме рис. 2 реализуется равенство:

$$C_3 + C_{1\Sigma} = C_{2\Sigma}. \quad (10)$$

Заметим, что в традиционных схемах введение шунтирующего конденсатора C3 параллельно любым цепям передачи сигнала привело бы к сужению полосы пропускания ОУ.

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики сравниваемых схем при 100 % отрицательной обратной связи. Из этих графиков

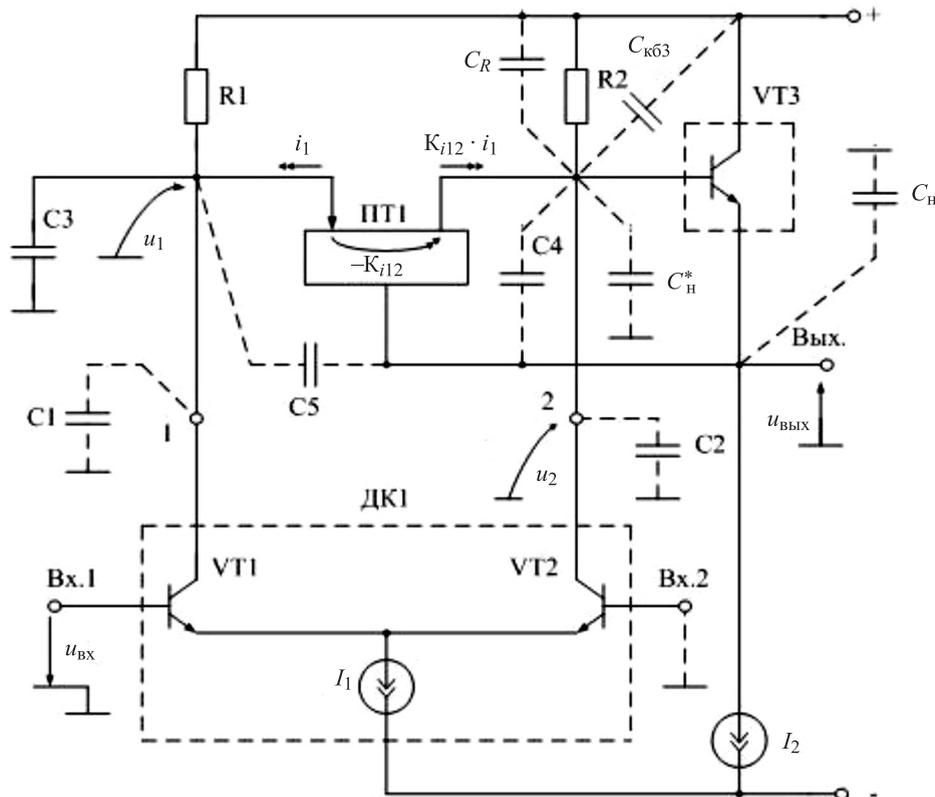


Рис. 2. Способ расширения частотного диапазона ОУ

следует, что классический ОУ при 100 % обратной связи имеет коэффициент передачи $K_{п} \approx -1$ дБ, что обусловлено сравнительно небольшим его усилением в разомкнутом состоянии. В то же время

предлагаемый ДУ при емкости коррекции между узлами 2 и 3 ($C_{корр} = 7$ пФ) имеет $K_{п} = -0,005$ дБ до частоты 2,8 ГГц.

На рис. 4, а приведена схема ОУ (см. рис. 2)

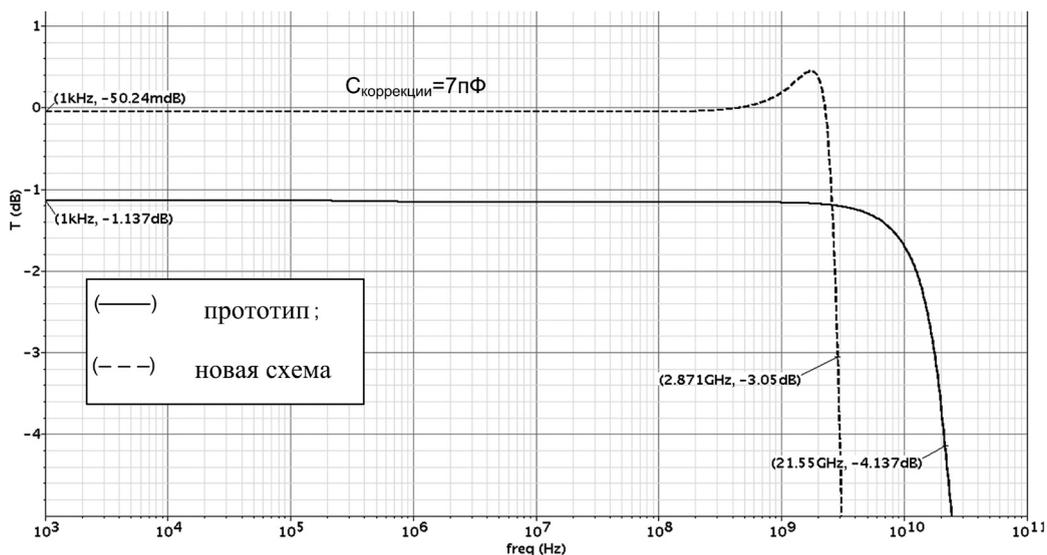


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики сравниваемых схем ОУ при 100 % отрицательной обратной связи

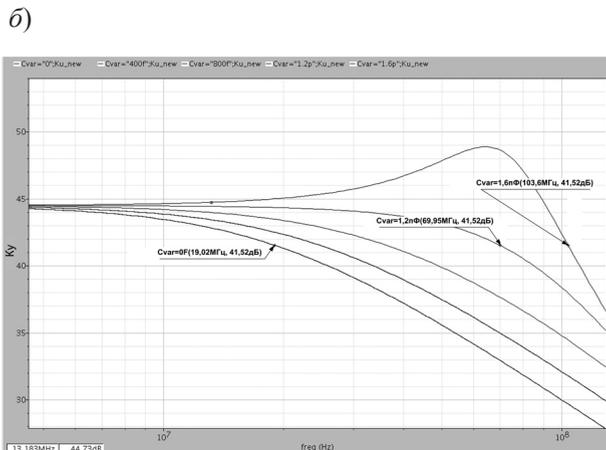
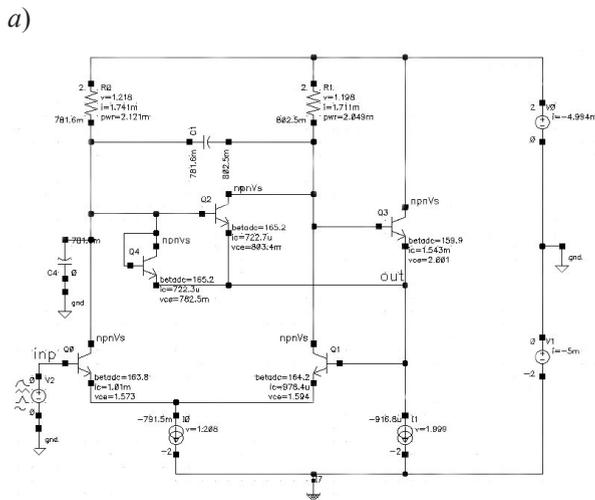


Рис. 4. Схема ДУ (см. рис. 2): а – в среде компьютерного моделирования Cadence и ее амплитудно-частотная характеристика; б – без обратной связи при разных C_4

в среде Cadence, а на рис. 4, б – зависимость ее верхней граничной частоты (по уровню -3 дБ) от емкости дополнительного конденсатора C_3 . Введение данного конденсатора расширяет полосу пропускания ОУ в 4–5 раз, что не наблюдается в классических схемах.

Рассмотренный метод повышения коэффициента усиления и расширения диапазона рабочих частот имеет существенные преимущества по сравнению с известным по коэффициенту усиления по напряжению K_y , частотному диапазону и, как показывает эксперимент, напряжению смещения нуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент Франции № 2409640
2. Патент США № 5.886.577
3. **Voinigescu, S.P.** Design Methodology and Applications of SiGe BiCMOS Cascode Opamps with up

to 37-GHz Unity Gain Bandwidth [Текст]/S.P. Voinigescu [et al.]/IEEE CSICS, Techn. Digest.–Nov. 2005.–Фиг. 2. P. 283–286

УДК 535.241.19

С.А. Рогов, С.В. Розов, В.В. Скороход

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Акустооптические устройства находят применение для спектрального и корреляционного анализа сигналов и решения других задач обработки информации, где требуется высокая скорость выполнения математических преобразований. Достоинства акустооптических (АО) устройств по сравнению с чисто электронными аналогами – простота, меньшие габариты, энергопотребление

и стоимость. Их недостатком считается сравнительно низкий динамический диапазон, связанный с нелинейностью АО взаимодействия. Практически он не превосходит 30–40 дБ.

С целью увеличения динамического диапазона АО устройств могут использоваться различные приемы, например, двухканальные системы [1] или устройства интерференционного типа [2, 3],



однако использование этих методов в практических системах оказывается достаточно сложным. Во многих задачах высокие требования к динамическому диапазону обрабатываемых сигналов определяются неизвестным уровнем сигнала на входе системы. При этом достаточно согласовать уровень входных сигналов с динамическим диапазоном АО устройства с помощью автоматической регулировки усиления (АРУ).

Устройство АРУ состоит, как правило, из чувствительного элемента, определяющего уровень сигнала в некоторой точке системы, петли обратной связи и регулирующего элемента. В АО анализаторе спектра с ПЗС-фотоприемником, в зависимости от расположения в системе чувствительного элемента, АРУ может ограничивать мощность сигнала перед АО модулятором, или уровень выходного сигнала фотоприемника. В первом случае АРУ не позволяет сигналу выйти за пределы динамического диапазона АО процессора. Чувствительный элемент такого АРУ измеряет уровень сигнала в усилительном тракте анализатора спектра. В качестве регулирующих элементов могут использоваться аттенуаторы, уменьшающие усиление радиотракта для больших сигналов.

В АРУ второго типа чувствительный элемент измеряет выходной сигнал ПЗС-фотоприемника. Регулироваться может усиление в радиотракте, мощность лазера, время накопления фотоприемника. Величина выходного сигнала ПЗС зависит не только от мощности, но и от длительности сигнала и ширины его спектра. Поскольку АРУ второго типа регулирует выходной сигнал анализатора спектра независимо от этих параметров, диапазон изменения мощности сигнала в тракте усиления АО процессора может быть снижен при обработке сигналов с разной длительностью и шириной полосы. Изменение мощности лазера для поддержания выходного сигнала ПЗС системой АРУ второго типа вряд ли целесообразно, т. к. при такой регулировке происходит одновременно и изменение шума (светового фона). Регулировка с использованием переменного накопления фотоприемника приводит к аналогичным результатам; кроме того, время накопления обычно стараются сделать минимально возможным для увеличения быстродействия всей системы. АРУ второго типа привлекает возможностью регулировки усиления в АО анализаторе спектра по выбранному сиг-

налу на выходе ПЗС. В условиях сильных помех при этом можно избежать подавления слабого сигнала, которое возникает в АРУ первого типа при регулировке усиления по помехе. АРУ второго типа, однако, требует фильтрации помехи в регистрируемом спектре с помощью вторичной цифровой обработки и, в целом, оказывается достаточно сложным устройством.

Нами был разработан АО анализатор спектра с простой цифровой АРУ первого типа. Исследования показали, что диапазон изменения мощности входных сигналов анализатора составил 60 дБ. Динамический диапазон АО процессора по двум сигналам, ограниченный появлением над оптическим фоном интермодуляционных членов третьего порядка составлял при этом 35 дБ, динамический диапазон системы съема на основе линейного ПЗС-фотоприемника – 25 дБ.

Функциональная схема устройства АРУ приведена на рис. 1. Устройство работает следующим образом. Высокочастотный сигнал с уровнем, определяемым аттенуаторами «атт», детектируется и усиливается логарифмическим усилителем.

На входе АЦП появляется цифровой код, пропорциональный логарифму входного уровня. В контроллере формируется скользящий массив принятых значений кода; элементы массива усредняются с небольшой постоянной времени для сглаживания коротких выбросов при обработке импульсных сигналов. Постоянная времени усреднения может варьироваться в зависимости от характера сигнала и помех на входе системы. Из ряда сглаженных значений амплитуды выбираются максимальные за время измерения и сравниваются с порогом срабатывания. В случае превышения максимума над порогом контроллер вырабатывает управляющий сигнал для аттенуатора, уменьшая, тем самым, усиление радиотракта до подпорогового значения.

Величина порога выбирается экспериментально, исходя из отсутствия насыщения ПЗС-фотоприемника для обрабатываемых сигналов. При таком пороге динамический диапазон системы по двум сигналам не превышает динамического диапазона ПЗС-фотоприемника, а диапазон изменения уровня входных сигналов равен динамическому диапазону ПЗС-фотоприемника плюс глубина регулировки АРУ.

Глубина регулировки АРУ ограничивается диапазоном регулировки затухания аттенуаторов

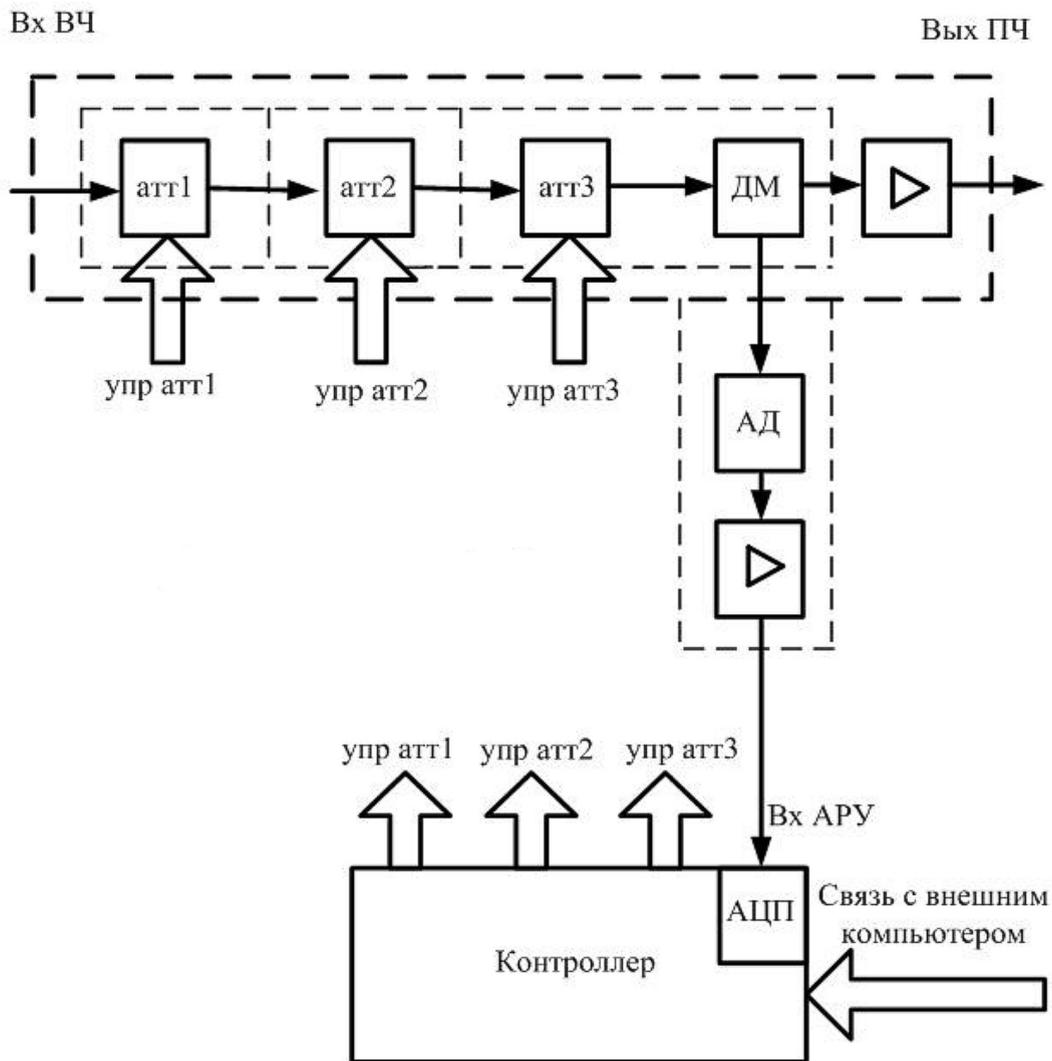


Рис.1. Функциональная схема АРУ
 att – аттенюатор; АД – амплитудный детектор; ДМ – делитель мощности

и верхней границей динамического диапазона ВЧ тракта в точке измерения уровня сигнала. Для увеличения глубины регулировки может быть предусмотрен второй порог, величина которого находится за пределами линейного участка амплитудной характеристики ВЧ тракта. Если этот порог превышает, устройство АРУ вводит ступенчатое ослабление в сигнал, позволяющее произвести точное измерение его в пределах линейного участка и обеспечить необходимую регулировку коэффициента усиления системы. В рассмотренном варианте системы АРУ этот метод увеличения динамического диапазона не использовался.

Сигнал в усилительном тракте после обработки устройством АРУ зависит от величины

входного сигнала и от величины порога срабатывания АРУ. При наличии помехи, с порогом АРУ сравнивается величина суммарного сигнала, зависящего от амплитуд сигнала и помехи и принципиальной схемы детектора и усилителя сигнала АРУ.

В действующем макете акустооптического анализатора спектра в качестве измерительного элемента использовалась микросхема LT5534, которая представляет собой логарифмический усилитель-детектор с динамическим диапазоном 60 дБ и полосой рабочих частот 50–3000 МГц (рис. 2) [4].

В основу работы LT5534 положен принцип кусочно-линейной аппроксимации сквозной логарифмической функции.

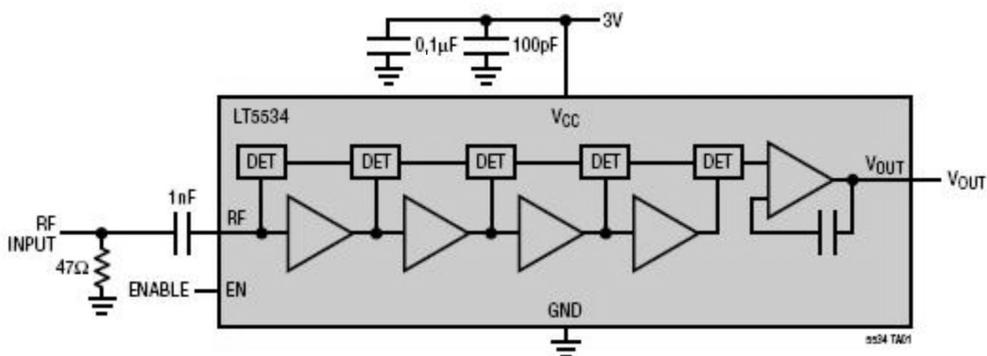


Рис. 2. Структурная схема микросхемы LT5534

рифмической характеристики цепочкой каскадно включенных усилителей-ограничителей с декадным шагом ограничения. Выход каждого ограничителя снабжен отдельным детектором сигнала, последующее суммирование выходных сигналов детекторов формирует итоговую сквозную логарифмическую характеристику.

Для аналогово-цифрового преобразования сигналов в разработанном устройстве АРУ использовался 12-разрядный АЦП типа AD9235BRU-40 с частотой преобразования 40 МГц, тактовой частотой – 80 МГц. Время измерения амплитуды сигналов в АРУ могло устанавливаться в широких пределах в зависимости от характера обрабатываемых сигналов. В качестве регулирующих элементов применены три аттенюатора типа HMC 306 MS10 (Hittite) с временем установления 50 нс

и общей глубиной регулировки усиления 45 дБ.

Экспериментальные зависимости величины максимума спектра сигнала, регистрируемого ПЗС-фотоприемником, от мощности сигнала на входе анализатора спектра приведены на рис. 3. Для оценки работы АРУ в присутствии помех на вход системы подавались два сигнала. В качестве источников сигнала и помехи использовались генераторы Г4-78, работающие на частотах около 1 ГГц и модулируемые импульсами генераторов Г5-54 длительностью 20 мкс с частотой повторения 1,5 кГц. При имитации непрерывной помехи один из генераторов работал в непрерывном режиме.

Из графиков на рис. 3 видно, что при помехе, превышающей уровень сигнала, наблюдается подавление сигнала помехой, поскольку регу-

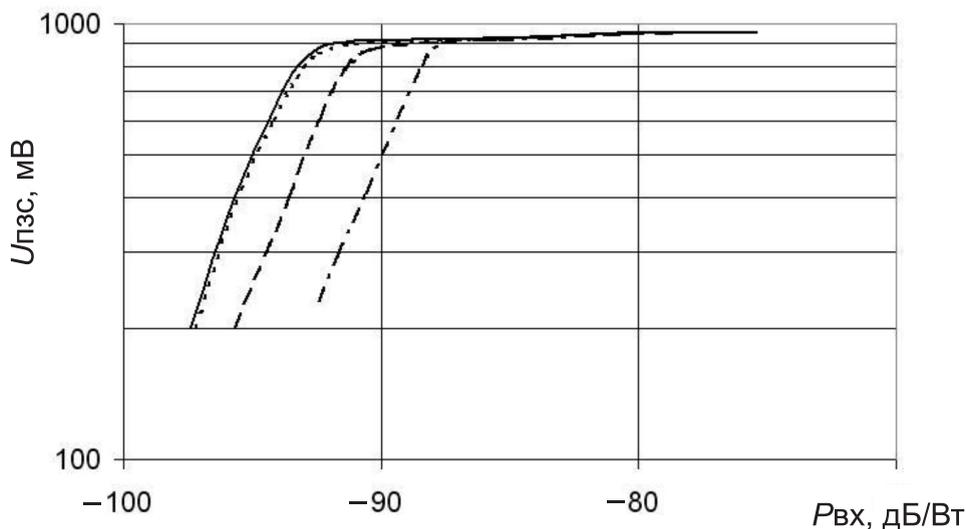


Рис. 3. Характеристики АРУ для импульсного сигнала и непрерывной помехи
 (—) $U_{\text{пом}} = 0$; (----) $U_{\text{пом}} = U_{\text{пор}}$; (- · -) $U_{\text{пом}} = 2U_{\text{пор}}$; (- - -) $U_{\text{пом}} = 4U_{\text{пор}}$

лировка усиления в этом случае определяется, в основном, помехой. Измерения показали, что характеристики для импульсной и непрерывной помехи отличаются мало. Полученные характеристики отражают работу системы для сравнительно слабых сигналов. При дальнейшем увеличении сигнала на входе, сигнал на выходе остается равным пороговому в пределах глубины регулировки АРУ.

Экспериментальные исследования подтвер-

дили возможность создания АО устройств с повышенным динамическим диапазоном за счет применения устройства АРУ.

Разработано и практически реализовано простое цифровое устройство АРУ для АО анализатора спектра, позволившее увеличить динамический диапазон системы до 60 дБ. Указана возможность увеличения этой величины.

Предложенная схема может быть использована не только в анализаторе спектра, но и в других АО устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсак, Дж.М.** Фотодетекторы для акустооптических систем обработки сигналов [Текст]/Дж.М. Борсак//ТИИЭР.–1981.–Т. 69.–№ 1.–С. 117–137.

2. **Anderson, G.W.** Role of photodetectors in optical signal processing [Текст]/G.W. Anderson, B.D. Guenther, J.A. Hyneczek [et al.]//Applied Optics.–Vol.27.–№ 14.–Р. 2871–2886.

3. **Грачев, С.В.** Гомодинный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием [Текст]/С.В. Грачев, А.Н. Рогов, В.Н. Ушаков//Радиотехника.–2003.–№4.–С. 23–28.

4. Linear technology LT5534. [Электронный ресурс] Р. 8.–www.linear.com

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПОИСКА ПАРТНЕРОВ И ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ КЛАССА ERP

Современные информационные технологии – PLM (Product Lifecycle Management) – позволяют принципиально улучшить методы и процессы проектирования, производства и сопровождения сложных наукоемких изделий на основе концепции жизненного цикла продукции [1]. Особое место занимает организация проектирования и производства наукоемкой продукции на основе использования широкой кооперации различных предприятий. В статье анализируются особенности организации проектирования и производства наукоемкой продукции на основе кооперации, предлагаются отдельные проектные решения по информационной поддержке процессов управления поставщиками материалов и комплектующих изделий на основе применения инструментальных средств систем класса ERP (Enterprise Resource Planning).

Виртуальное предприятие – структурная форма организации кооперации предприятий

При разработке проекта кооперации предприятий для изготовления продукции необходимо решить две группы задач. Первая группа определяется формированием состава партнеров по кооперации, а вторая связана с организацией управления проектом, совместно выполняемым всеми участниками кооперации. В современной «информационной» экономике одним из ключевых факторов конкурентоспособности является скорость реакции на оперативные рыночные изменения. Развитие информационных технологий, изменения конкурентной ситуации на рынке и все более узкая специализация в сферах производства и услуг обуславливают появление новых форм ведения бизнеса.

Классическая система кооперации SCM (Supply Chain Management) создается для долгосрочного сотрудничества, имеет относительно стабильную структуру сети и производственную программу, в которой определены виды производимой продукции, а также исполнители работ на длительный период времени. Основная цель классической кооперации – создание системы взаимодействия предприятий, направленной на повышение качества планирования и управления за счет единых информационных каналов, синхронизации бизнес-процессов, совместное планирование спроса и запасов. При этом в классической системе кооперации существуют жесткие требования к наличию информационных систем для планирования и управления, а также к одноформатности представления данных. К недостаткам SCM следует отнести значительные затраты на информационные технологии и высокую степень зависимости от партнеров. Одной из форм развития SCM является разработка концепции виртуального предприятия при организации кооперации.

Основная цель виртуального предприятия – быстрое реагирование на рыночные требования и максимизация степени использования ресурсов предприятий. Учет факторов риска при ведении бизнеса на принципах виртуального предприятия имеет свои особенности на всех этапах жизненного цикла. Применительно к фазам принятия решения о кооперации и выборе партнеров наиболее актуальны вопросы организационных рисков. На стадиях планирования работ и их реализации особое значение имеет рассмотрение операционных рисков. При построении кооперационной стратегии ведения бизнеса предприятия неизбежно стал-

Преимущества и недостатки кооперации предприятий

Объекты	Преимущества	Недостатки
Риски	Распределение рисков проекта между участниками	Появление новых рисков, связанных с кооперацией
Затраты	Снижение затрат за счет узкой специализации участников	Увеличение затрат на управление проектом, транспортных расходов
Результаты	Повышение качества конечного продукта Сокращение сроков получения конечного результата	Частичная потеря «ноу-хау»
Ресурсы	Усиление финансового потенциала Усиление технологического потенциала Усиление научного потенциала	Частичная потеря управления собственными ресурсами

квиваются не только с новыми возможностями, но и с новыми потенциальными опасностями.

К основным преимуществам кооперации в виртуальных предприятиях относятся: возможность быстрого освоения новых рынков, сокращение затрат, взаимная передача технологий и «ноу-хау», дополнительные инвестиционные возможности, разделение рисков среди партнеров в виртуальном предприятии. К основным рискам (недостаткам) кооперации относятся увеличение зависимости от партнеров по бизнесу, риск утраты «ноу-хау» и конкурентных позиций. Кооперация не только способствует разделению рисков между участниками логистической цепи и снижению неопределенности, но и индуцирует создание новых рисков, связанных с взаимодействием предприятий. Общепринятая схема учета факторов риска при организации системы SCM состоит из четырех этапов: идентификации рисков, их оценки, выработки управленческих решений по снижению риска, разработки системы мониторинга. В таблице приведены преимущества и недостатки кооперации в рамках виртуального предприятия.

Виртуальное предприятие при организации кооперации представляет собой своего рода «предприятие над предприятиями», в рамках которого может существовать множество логистических сетей. Причем одно и то же предприятие может входить в состав различных виртуальных предприятий. Механизм формирования логистических цепей в виртуальных предприятиях отличается от классической концепции SCM. Логистические цепи возникают динамически из множества альтернативных вариантов под каждый проект, при этом в них нет таких жестких требований к информационной технологии, как в SCM. В виртуальных предприятиях возможно

использование интернет-ресурсов координатора, например, с помощью ASP-технологии, реализующей модель аутсорсинга, предоставляющей клиентам необходимые программные продукты на определенный срок на условиях аренды через Интернет. Концепция аутсорсинга позволяет избежать существенных затрат на создание и поддержание предприятиями собственной сложной инфраструктуры информационных технологий. Подобное расширение классов решаемых задач и рассматриваемых процессов в ряде современных исследований трактуется как переход от классического управления поставками к управлению цепями создания стоимости (Value Chain Management).

Партнерские взаимоотношения между поставщиком и потребителем

Рассмотрим некоторые особенности организации партнерских взаимоотношений между поставщиком и потребителем, которые определяют перспективность развития бизнеса. Приоритетными направлениями при решении задач кооперации являются следующие: качество, цена, инновации, услуги по обслуживанию. Партнерство и сотрудничество должно основываться на схеме системы менеджмента качества, которая соответствует главным требованиям к организации бизнеса. Использование современных методов менеджмента качества является непременным условием выбора поставщика. Одно из важнейших условий успешной кооперации – целенаправленная работа по совершенствованию процессов, обеспечивающих реакцию всех участников кооперации на любой возникающий инцидент.

Запросы к партнерам по кооперации могут включать следующие основные данные: чертежи, стандарты, требования к качеству, основ-



ные предварительные положения по логистике; спецификации изделий (материалы, комплектующие изделия, услуги), спецификации процессов и тестов, формы для заполнения по компонентам, имеющим отношение к предложениям; документы, специфичные для конкретного производства. Поставщик предоставляет предложения в форме, определенной покупателем. Процесс взаимодействия строится в виде письменных (бумажных) запросов либо запросов в электронной форме. Заказы могут быть размещены также с помощью online аукциона. Все документы должны быть проверены получателем запроса. Предложения могут приниматься во внимание, если они представлены на рассмотрение в форме, определенной заказчиком, и соответствуют следующим правилам:

- *Поставщик* должен полностью действовать в соответствии с требованиями, содержащимися в документах, пока не будут сделаны необходимые изменения или исключения;
- *Поставщик* обязан проверять через регулярные интервалы времени обновление документов и выполнение текущих требований.

При организации кооперации поставщик проводит изучение выполнимости заказа в соответствии со своими техническими возможностями и производственными мощностями и посылает свое предложение в отдел закупок кооперации. Любые возможные улучшения выполнения заказа (повышение качества, новый проект) или потенциальные проблемы должны быть ясно выражены в новом предложении. Конструктивные предложения позитивно оцениваются конечным выбором поставщика. Для ведения заказа должно быть назначено контактное лицо для поставщика. Отдел закупок координирует все ответы/вопросы и передает их ответственному специалисту отдела.

Процесс выбора поставщика, который получает заказ на новые разработки или серийное производство, зависит от многих факторов, которые можно сформировать в следующие группы.

Группа оценки качества продукции рассматривает имеющийся опыт поставщика в конкретной области промышленности, особенно в необходимой технологии; оценивает тип используемой системы менеджмента качества, проверяет наличие сертификатов и принятых спецификаций качества продукции в целом и ее компонентов, наличие подписанного с заказчиком генерального соглашения по качеству.

Группа организации закупок анализирует общую стоимость исполнения заказа; формирует предпочтительный рейтинг поставщиков в документе оценки поставщика; составляет коммерческое ранжирование поставщиков, фиксирует наличие соглашений со стратегическим поставщиком; осуществляет быстрое разрешение проблем с дополнительными расходами, возникшими из-за поставщика, формирует оценку о надежности поставщиков и возможности дальнейшего сотрудничества.

Группа контроля инжиниринга определяет соответствие технических условий используемых компонентов, которые предлагаются поставщиками, техническим требованиям конечной продукции; сопоставимость свойств и характеристик предлагаемых компонентов с конечной продукцией; оценивает возможность адаптации компонентов к изменяющимся требованиям потребителя; наличие многоформатности в информационной поддержке разработок, предлагаемых поставщиком; наличие успешного опыта в предыдущих работах с конкретным поставщиком.

Группа организации логистики оценивает надежность доставки; гибкость и скорость реакции на изменяющиеся потоки материалов и информации; возможность постоянной оптимизации процесса поставки, приемки и реализации стандартизированных моделей закупок; наличие прошлого опыта работы с поставщиками (относительно вышперечисленных пунктов); учитывает результаты аудита процесса логистики и/или самооценки.

Суммарная оценка при выборе поставщика производится по рассмотренным направлениям: качество, закупки, инжиниринг, логистика. Каждый компонент определяет возможность для улучшений и позволяет систематически сравнивать возможности поставщиков на международном уровне и формирует основу для совместных программ улучшений, согласованных со стратегическими поставщиками. Поставщики стратегической важности и предпочитаемые поставщики могут определяться из группы поставщиков для всей продукции, закупаемой с использованием базы данных предпочитаемых поставщиков, таким способом можно определить поставщиков с высоким уровнем качества выполнения для включения их в проекты. Ключевые оценки по качеству и логистике должны выставляться ежемесячно, т. к. они используются для текущего мониторинга выполнения заказа поставщиком.

Организация кооперации между предприятиями связана со сбором и обработкой больших объемов самых разнообразных данных разного формата. Поэтому одной из важных задач информационной поддержки кооперации является создание единого информационного пространства для накопления, хранения и представления данных о потенциальных участниках кооперации, проектах и заказчиках. Процесс образования коалиции (виртуального предприятия) в рамках кооперации на всех стадиях требует доступа всех потенциальных участников к информации о предприятиях, технологиях и проектах [2].

Формирование анкет для потенциальных исполнителей заказа

Создание информационной системы поиска партнеров и проектов (ИС ПП) для потенциальных участников кооперации – актуальная задача. Существует, по крайней мере, два подхода к построению ИС ПП при организации кооперации:

создание централизованной региональной информационной системы технологических и производственных возможностей предприятий – опирается на единые классификаторы и справочники, на основе которых каждый потенциальный участник кооперации должен представить данные о своих технологических и производственных возможностях в рамках жесткой централизованной информационной модели;

создание распределенной информационной системы обмена данными типа «необходимые требования – множество предложений» между предприятиями – опирается на подготовку и рассылку специализированных анкет одними участниками и их заполнение другими заинтересованными участниками, с последующей обработкой результатов анкетирования. Несомненно, полезным было бы создание соответствующего портала для размещения анкет с предоставлением удобных инструментов для конструирования анкет, их заполнения и обработки.

Рассмотрим особенности формирования анкет для потенциальных исполнителей заказа по назначению, структуре и форме представления. Данные анкеты можно разделить по назначению на две большие группы:

общего назначения, в которых фиксируются необходимые данные для общей оценки возможностей потенциальных исполнителей;

частного назначения, в которых устанавливаются технические требования по конкретным группам деталей и узлов.

С точки зрения требований к инструментальным средствам конструирования анкет указанное разделение на группы несущественно, поэтому в дальнейшем остановимся на анализе структуры анкет для общей оценки исполнителей. Типичной является анкета, содержащая следующие разделы:

фирма: данные о фирме, претендующей на контракт;

технология: общие данные о технологиях, используемых фирмой;

качество: данные по Системе Менеджмента Качества в фирме;

логистика: параметры внешней и внутренней логистики в фирме;

экономические показатели фирмы за последние несколько лет;

экология: данные о менеджменте окружающей среды.

Каждый раздел анкеты содержит, как правило, от 30 до 100 атрибутов. Типовыми являются следующие атрибуты: числовые; перечисления; логического типа; строковые; агрегаты; ссылки на другие информационные объекты.

Учитывая, что некоторые атрибуты имеют множественность 1–*n*, общее количество заполняемых значений может быть существенным. Для средних и крупных фирм число потенциальных поставщиков может превышать несколько сотен, поэтому сбор, хранение, обработка и анализ такого объема данных является достаточно трудоемкой задачей.

Сформулируем основные требования к системе поиска партнеров и проектов, которая должна обеспечить выполнение следующих функций:

оперативное проектирование структур разнообразных анкет и других документов управления кооперацией и форм их представления;

формирование и ведение разнообразных справочников, используемых при заполнении документов;

формирование типизированных атрибутов документов;

рассылка (или передача права доступа) анкет потенциальным поставщикам;

сбор, накопление и обработка анкетных данных в соответствии с запросами специалистов.

Перечисленные требования могут обеспечиваться как системами электронного документо-

оборота, так и системами класса ERP, в которые встраиваются инструментарий и исполнительные средства поддержки электронного документооборота. Кроме того, ERP-системы имеют в своем наличии необходимый набор справочников производственных элементов. Требования к системе поиска партнеров и проектов в полной мере могут быть выполнены только на основе использования объектно-ориентированной технологии проектирования. Рассмотрим некоторые проектные решения по созданию системы поиска партнеров и проектов.

Проектные решения для моделирования информационного объекта *Анкета* будем основывать на инструментальных возможностях объектного представления модели домена проблем [3]. Целесообразно представить анкету и некоторые связанные с ней объекты как подклассы информационного объекта *Документ*. На рис. 1 представлен фрагмент схемы классификации, показывающий место *Анкет* в общей структуре информационных объектов информационно-управляющей системы предприятия. Схема соответствует нотации графического языка моделирования UML и выполнена с использованием специализированного редактора Rational Rose Enterprise Edition. Нотация класса представляет собой прямоугольник, разделенный на

три зоны. Первая зона предназначена для имени класса. Вторая зона используется для атрибутов класса. В третью зону вносятся спецификации операций (методов) класса. Выделяется два вида зависимостей между классами: обобщение/конкретизация (дуга заканчивается треугольником) и ассоциация. Важная часть описания ассоциации – указание варианта множественности. Варианты множественности принято обозначать следующим образом: ноль или один (0..1), ноль или много (0..n), один – 1, один или много (1..n), много – (n). По крайней мере, один конец дуги ассоциации должен быть поименован. На схеме рис. 1 использованы только отношения обобщения и конкретизации.

Из рисунка видно, что в схему классификации информационного объекта *Документ* включены следующие сущности:

Документы по внешним связям позволяет выделить группу документов, связанных с организацией кооперации;

Контракт позволяет поддерживать информационные процессы подготовки и выполнения контрактов;

Анкета позволяет выделить группу документов, связанных с подготовкой анкет, их рассылкой, сбором данных и обработкой анкет;

Аудит по кооперации позволяет формировать

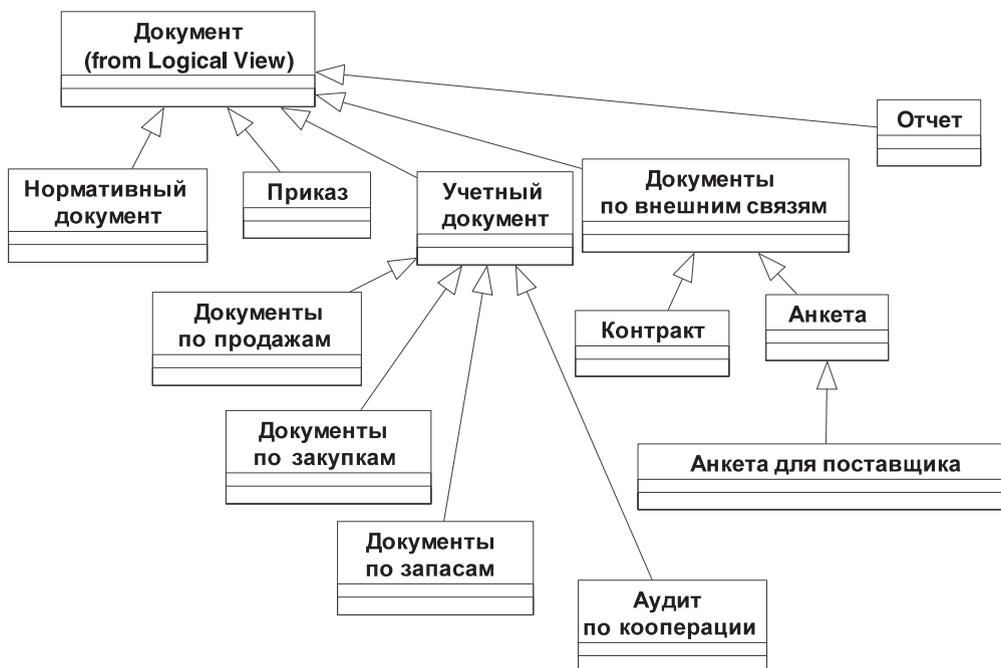


Рис. 1. Расширение схемы классификации информационного объекта *Документ* для моделирования *Анкет*

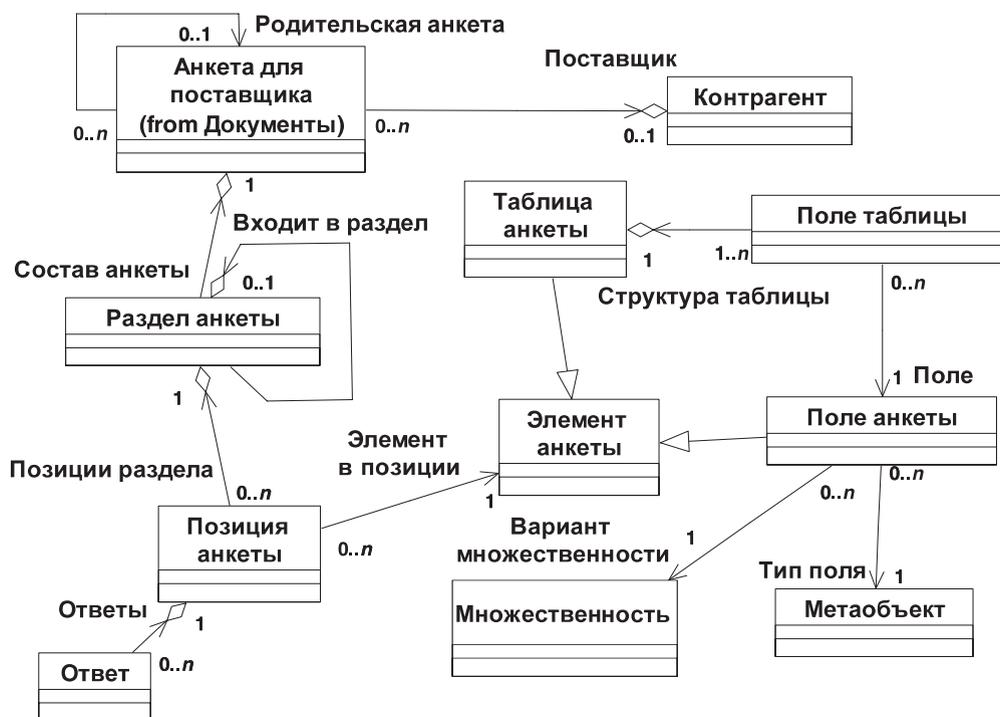


Рис. 2. Модель анкеты. Диаграмма классов

программы аудита, собирать и обрабатывать данные аудита контрагентов.

На рис. 2. приведена информационная модель анкеты, в которой отражены решения по моделированию структуры анкеты. Для моделирования структуры разнообразных анкет используется механизм дополнительных характеристик, встроенный в систему класса ERP.

Для определения источника данных анкеты используется сущность *Контрагент* и ассоциация *Поставщик*. Структура анкеты на верхнем уровне детализации описывается как состав разделов (сущность *Раздел анкеты*). Разделы анкеты могут иметь иерархическую структуру (ассоциация *Входит в раздел*). Сущность *Элемент анкеты* позволяет создавать и описывать необходимый список специальных информационных объектов, с помощью которых можно задать требуемые свойства разделов анкет. Для этого введена сущность *Позиция раздела* и ассоциация *Элемент в позиции*. Выделено два больших подкласса сущности *Элемент анкеты* – сущности *Таблица* и *Поле анкеты*. Для спецификации полей анкет используются сущности *Множественность*, *Метаобъекты* и соответствующие ассоциации *Вариант множественности* и *Тип поля*. Для фиксации ответов по позициям анкет введена сущность

Ответы и ассоциация *Ответ*. Ограничения на возможные варианты ответов задаются на основе типизации *Элементов анкет*. Определение сущности *Анкета* как подкласса сущности *Документ* позволяет использовать весь набор сервисов для спецификации документов на основе механизма дополнительных характеристик, который, как правило, встроен в среду ERP-системы [3].

Для обработки *Анкет* предлагается использовать механизм запоминаемых *Фильтров*. На рис. 3 представлено общее проектное решение по моделированию *Фильтров*, применимое и к классу *Анкеты*.

Сущность *Фильтр* позволяет вести реестр фильтров (объявление, редактирование, права доступа и др.). Спецификация фильтра представляется в виде функции отбора (сущность *Элемент функции отбора*), содержащей список предикатов, связанных операторами *and*, *or*, *not*. Каждый предикат определен на множестве значений соответствующей характеристики (ассоциация *Аргумент*).

Описанная выше модель информационного объекта *Анкета* и инструментальные возможности объектного моделирования позволяют создать *Конструктор анкет* и решить вопрос их обработки.

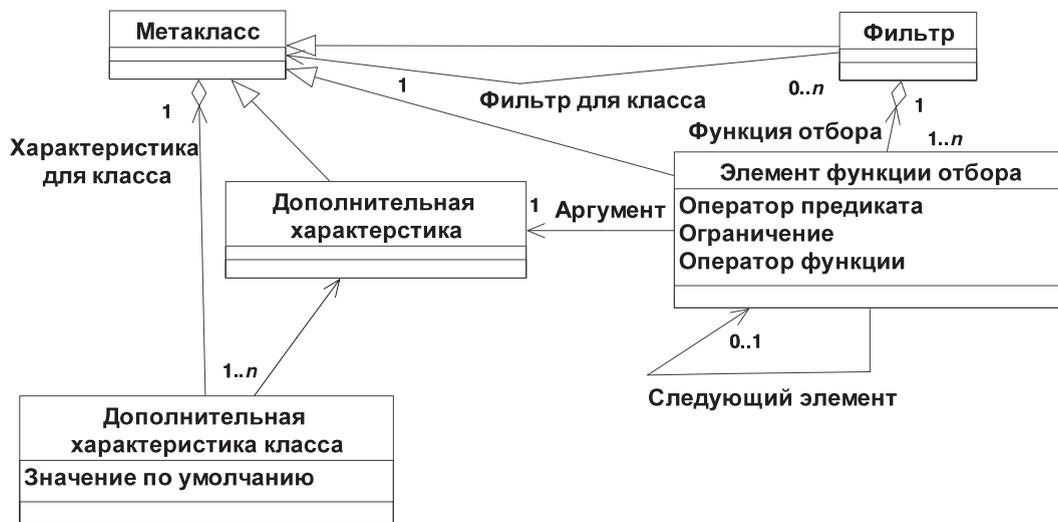


Рис. 3. Модель фильтра для обработки Анкет

Рассмотрим пример формирования анкет для потенциальных исполнителей заказа.

Вводим несколько дополнительных классов *Документов*.

Формируем *Анкеты* по назначению: *Анкеты поставщиков деталей и узлов; Аудиты клиентов; Инструменты по гарантии качества*.

Создаем необходимый список недостающих перечислений для построения *Анкеты* (*Организационно-правовые формы фирм; Формы оплаты труда; Модели распределения рабочего времени* и др.).

Создаем необходимое множество классов для описания недостающих объектов, используемых в анкете (*Группы продукции; Группы технологий; Экономические показатели* и др.).

Создаем необходимое множество дополнительных характеристик различных типов и включаем их в состав класса *Анкеты для поставщиков деталей и узлов*. Разделы анкеты моделируем как агрегированные характеристики, в состав которых включаем необходимые дополнительные характеристики анкеты.

Рассмотрим особенности редактирования анкет. На рис. 4 представлен пример редактирования конкретного экземпляра анкеты, которая имеет структуру, созданную с использованием *Конструктора анкет*.

Создание конкретной анкеты выполняется с использованием стандартной опции *Создать*. Для редактирования используются стандартные операции редактирования характеристик документов. Анкета открыта на разделе *Технология*.

Характеристика *Производственное оборудование* требует указать список имеющихся моделей оборудования с указанием года выпуска.

Сбор данных по анкетам может осуществляться в следующих вариантах:

поставщики заполняют анкеты на сайте заказчика;

структура *Анкеты* конвертируется в xml – файлы *.dtd – файл структуры документа в модели DOM и файл справочных данных и данных сценария для заполнения анкеты, результаты отсылаются заказчику, загружаются в систему ведения анкет для дальнейшей обработки.

Для обработки анкет предлагается использовать *Конструктор фильтров*, который позволит сформировать необходимые условия для отбора анкет, запомнить этот фильтр, многократно применять его для отбора анкет, редактировать условия отбора анкет, представлять результаты обработки анкет, применять к полученному набору данных новые сложные фильтры. Форма для редактирования фильтра представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что фильтр для обработки анкет поставщиков деталей и узлов изделия (необходимые условия) содержит достаточно сложную функцию для отбора анкет, определенную на параметрах анкеты. В правой части формы имеются два дополнительных окна. Первое из них позволяет описать структуру для формы представления отобранных анкет. Второе позволяет задать условия сортировки списка отобранных данных. Для отбора анкет, удовлетворяющих достаточным условиям, предъявляемым к поставщикам,

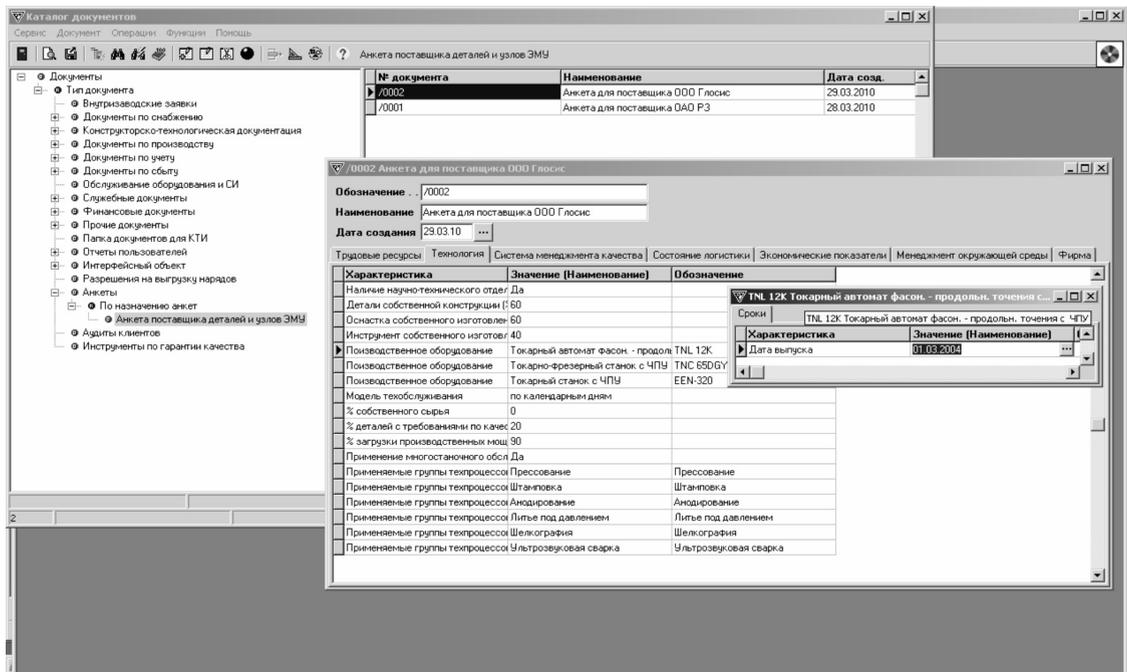


Рис. 4. Пример редактирования анкеты

формируется еще один фильтр.

В качестве основы для отбора исполнителей предлагается использовать гибкую систему их опроса на основе *Анкет* с последующим *Аудитом*. Для отбора исполнителей в условиях кооперации предлагается следующая схема.

1. Формируется структура анкеты, в которую включается необходимый состав показателей, отражающих необходимые свойства потенциального поставщика.

2. В качестве критериев предлагается использовать всего два показателя: время производственно-

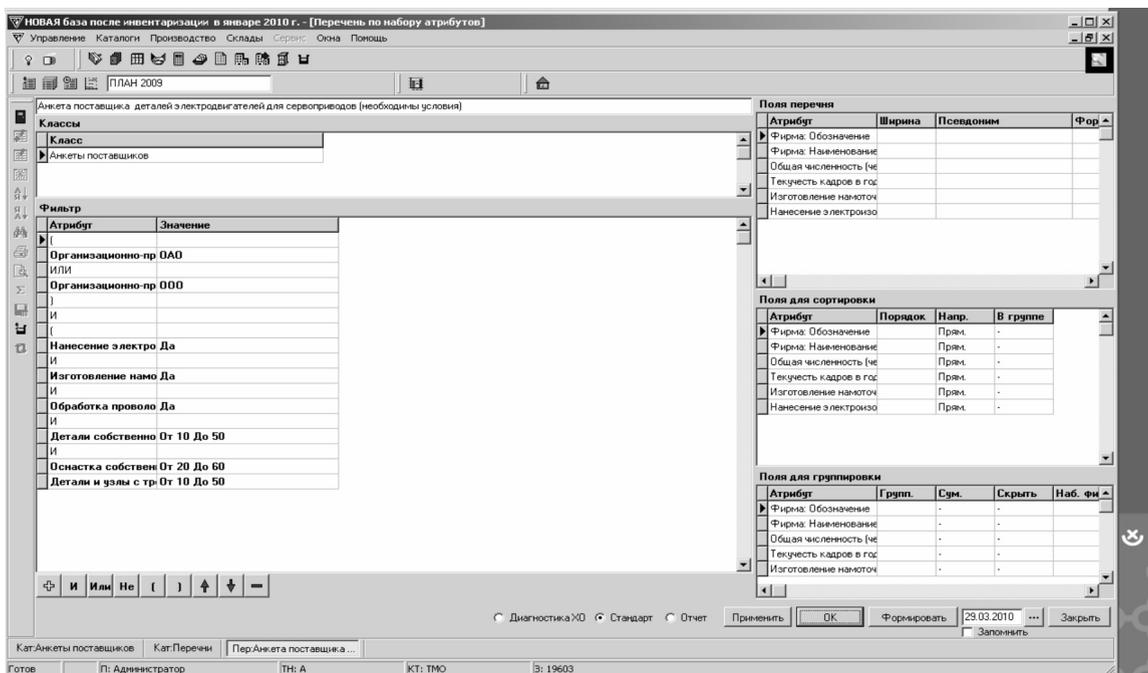


Рис. 5. Форма для конструирования фильтров



го цикла (время выполнения работы) и стоимость работ. Для всех остальных показателей необходимо задать различные уровни ограничений.

3. Конструируется несколько фильтров, позволяющих последовательно ужесточать требования к претендентам (например, фильтр, отражающий необходимые условия, которым должен удовлетворять поставщик, и фильтр, отражающий допустимые условия, которым должен удовлетворять поставщик).

4. Для претендентов, которые удовлетворяют достаточным требованиям, в зависимости от конкретных условий оставляют один из показателей (либо время, либо стоимость) исполнения заказа.

Приведенный в статье анализ построения информационно-управляющих систем в условиях кооперации показывает, что формирование коалиции партнеров по кооперации нуждается в серьезной информационной поддержке и в использова-

нии специализированных прикладных программ.

Формирование коалиции партнеров по проектам может быть успешно решено с помощью механизма специализированных анкет. Обработка анкет может быть основана на использовании фильтров, конструируемых прикладными специалистами в соответствии с целями отбора потенциальных партнеров.

Информационные системы поддержки жизненного цикла продукции (в частности, на этапе формирования состава исполнителей) должны строиться на основе объектно-ориентированных представлений с использованием инструментальных средств периода исполнения заказа, обеспечивающих необходимую гибкость приложений.

Эффективное решение за ограниченный срок по созданию специализированной информационной системы поиска партнеров и проектов может быть получено с помощью инструментальных средств ERP-системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голландцев, Ю.А.** Концептуальное проектирование промышленных роботов: учеб. пособ. [Текст]/ Ю.А. Голландцев. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.
2. **Фомина, Ю.Н.** Оптимизация конфигурирования и распределения заказов виртуального предприятия [Текст]/ Ю.Н. Фомина, Е.И. Яблочников, А.А. Со-

ломатина//Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО.–2008. –Т. 28.–С. 151–155.

3. **Советов, Б.Я.** Теория информационных процессов и систем [Текст]/Б.Я. Советов, В.А. Дубенецкий, В.В. Цехановский [и др.]. –М.: Изд. центр «Академия», 2010.

УДК 164.2

А.Г. Брехов, А.А. Грищенко

АСПЕКТЫ ПОНЯТИЙНОГО АППАРАТА ТЕОРИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИКОЙ

Управление логистикой – сложная система, созданная для сбора, анализа, переработки информации, принятия управленческих решений и планирования обеспечивающих действий с целью получения максимального конечного результата при определенных ограничениях (например, наличия ресурсов).

Как правило, представление объекта в виде системы связано с некоторыми трудностями из-за наличия множества определений системы и проблемы выбора единого определения, целиком ис-

пользуемого при построении реальной системы управления.

В статье определено четыре типа системных представлений, показанных на рис. 1: микроскопическое, макроскопическое, иерархическое и процессное.

Каждое из указанных представлений системы отражает определенную группу понятийного аппарата теории систем управления логистикой. Схема рассмотрения понятий изображена на рис. 2.

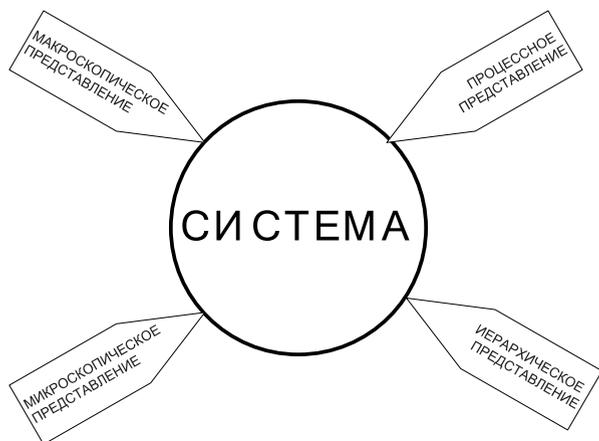


Рис. 1. Типы системных представлений

Понятия, характеризующие систему управления логистикой как структуру деятельного акта (процессное представление).

Всякие «системы», в т. ч. и система управления логистикой, так или иначе связаны с деятельностью человека либо в ее текущих проявлениях, либо являясь результатом какой-либо деятельности в прошлом, т. е. представляя определенные искусственные образования в материальной или абстрактной реализации.

Теория систем определяет систему типа «процесс» как процесс организации такого целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую «объектом», в результате которого удовлетворяются потребности субъекта,

взаимодействующего с этим объектом [2]. Деятельный акт – это какой-то процесс (явление) следовательно, должны быть какие-то действия, реализующие этот процесс (явление). Действий, которые могут реализовать этот деятельный акт, может быть бесконечное множество. Таким образом, система управления логистикой как процесс (действие) может быть реализована бесконечным множеством действий и будет состоять из бесконечного числа этих действий.

Анализ данных действий позволяет определить в теории систем управления логистикой понятия, характеризующие систему управления как структуру деятельного акта.

Рассматривая понятия, характеризующие систему управления логистикой как совокупность действий (функций), представим систему, обладающую определенными функциональными свойствами:

- потенциальные возможности системы (потенциал системы);
- готовность системы;
- устойчивость функционирования;
- непрерывность функционирования;
- оперативность функционирования;
- восстанавливаемость потенциала системы.

Потенциальные возможности системы управления логистикой – это возможности системы реализовать возложенные функции при отсутствии неблагоприятных воздействий.



Рис. 2. Схема рассмотрения понятий теории систем управления логистикой

Готовность системы – это возможность реализовать возложенные функции.

Устойчивость функционирования системы управления – это возможности системы управления выполнять возложенные функции при неблагоприятных воздействиях.

Непрерывность функционирования системы – это возможность реализовывать возложенные функции в установленном режиме функционирования.

Оперативность функционирования системы – это возможность реализовать возложенные функции в ограниченные временные параметры.

Восстанавливаемость потенциала системы управления – это возможности системы восстанавливать выведенные из строя мощности (строительные, портовые, дорожные и др.). Данное свойство характеризуется показателем восстанавливаемости системы управления логистикой за (время), доля от полных мощностей.

Понятия, характеризующие систему управления логистикой как множество наблюдаемых и неделимых величин (микроскопическое представление).

В современной науке простейшей неделимой частью системы является элемент, объем которого зависит от цели рассмотрения объекта как системы и от точки зрения на него или от аспекта его изучения [4, 5]. Таким образом, элемент системы управления – это предел членения системы с точки зрения решения конкретной задачи и поставленной цели управления. Например, элементом системы управления логистикой торгового-промышленного предприятия, с точки зрения решения задачи управления сырьевыми ресурсами, может быть оператор (диспетчер) пункта управления транспортным обеспечением

и подвозом материальных ресурсов центра управления запасами.

Однако система может быть разделена на элементы не сразу, а последовательным расчленением на подсистемы, которые представляют собой компоненты более крупные, чем элементы, и в то же время более детальные, чем система в целом. Возможность деления системы на подсистемы связана с вычленением совокупностей взаимосвязанных элементов, способных выполнять относительно независимые функции, подцели, направленные на достижение общей цели системы. Отсюда следует, что подсистема должна обладать свойствами системы (в частности, свойством целостности). Этим подсистема отличается от простой группы элементов, для которой не сформулирована подцель и не выполняются свойства целостности (для такой группы используется название «компоненты»).

Следующей величиной системы, отражающей наиболее существенные взаимоотношения между элементами и их группами (компонентами, подсистемами), является структура. Структура может быть представлена графически, в виде теоретико-множественных описаний, матриц, графов и других языков моделирования структур.

Понятийный аппарат основных структурных характеристик системы управления представлен на рис. 3.

На рис. 4 на примере пяти элементов представлены виды структур, с точки зрения топологии внутренних связей.

Связность структуры позволяет выделить наличие обрывов, определить необходимое минимальное количество связей в структуре системы управления.

Структурная избыточность отражает превышение общего числа связей над необходимым минимальным числом связей. Данная структур-



Рис. 3. Основные структурные характеристики системы управления

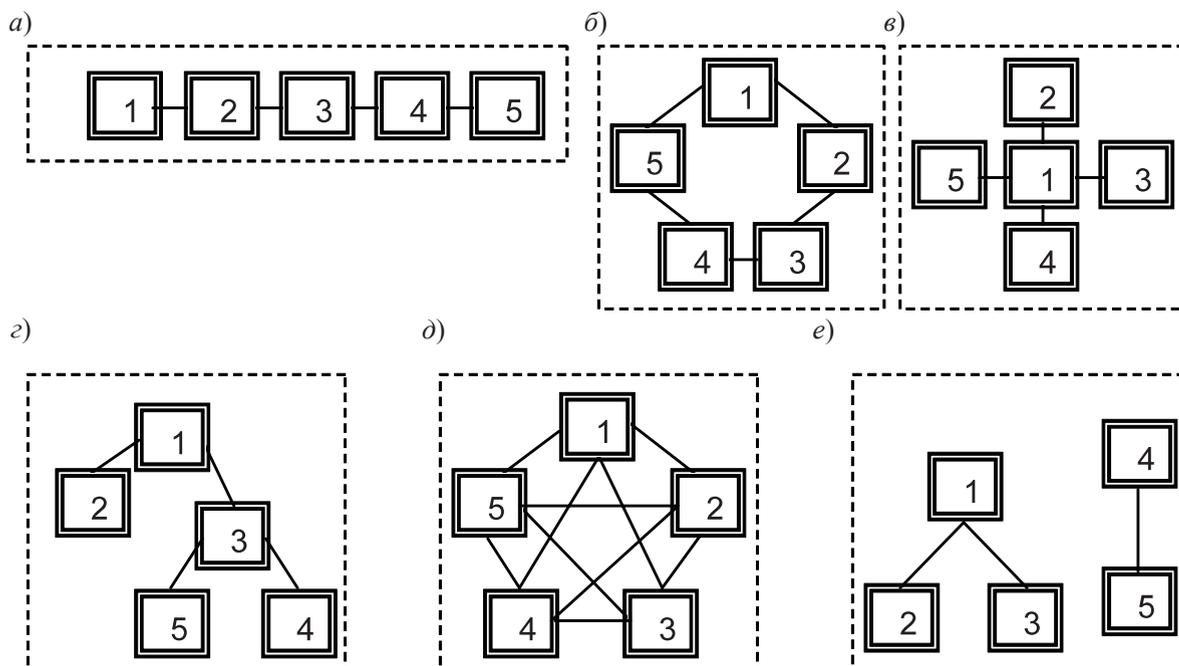


Рис. 4. Виды структур системы управления, с точки зрения топологии внутренних связей:
 а – последовательная структура; б – кольцевая структура; в – радиальная структура;
 г – древовидная структура; д – структура типа полный граф; е – несвязная структура

ная характеристика используется для косвенной оценки экономичности и надежности исследуемой системы.

Структурная компактность отражает общую структурную близость элементов в анализируемой структуре и так же как структурная избыточность используется для косвенной оценки экономичности и надежности исследуемой системы.

Степень централизации структуры отражает наименее «централизованные» и наиболее «размытые» элементы в анализируемой структуре и используется для более или менее равномерного распределения связей по элементам структуры системы управления.

Понятия, характеризующие систему управления логистикой как единое целое (макроскопическое представление).

Системы управления логистикой представляют собой сложные организационно-технические комплексы, симбиоз данных и знаний, оперативно-технических и экономико-математических моделей, инструментальных и технических средств, а также специалистов, предназначенных для обработки информации и принятия решений.

Можно рассматривать систему управления на эмпирическом уровне. Поэтому необходимо

определить понятийный аппарат, с точки зрения научного подхода.

Учитывая условность классификации [2], представленной на рис. 5, рассмотрим основные разновидности систем, характерные для систем логистического назначения.

Абстрактные системы – все их элементы являются понятиями. Использование данных систем характерно в теоретических изысканиях.

Конкретные системы – их элементы – физические объекты. Они подразделяются на естественные (возникающие и существующие без участия человека) и искусственные (созданные человеком). Примером искусственной конкретной системы является система управления логистикой.

Открытые системы – обмениваются с внешней средой веществом, энергией, информацией.

Закрытые системы – не обмениваются с внешней средой.

Динамические системы – представляют собой структуризованные объекты, имеющие входы и выходы; объекты, в которые в определенные моменты времени можно вводить и выводить вещество, энергию, информацию.

Адаптивные системы – функционируют в условиях начальной неопределенности и изменяющихся внешних условий, используют накоплен-

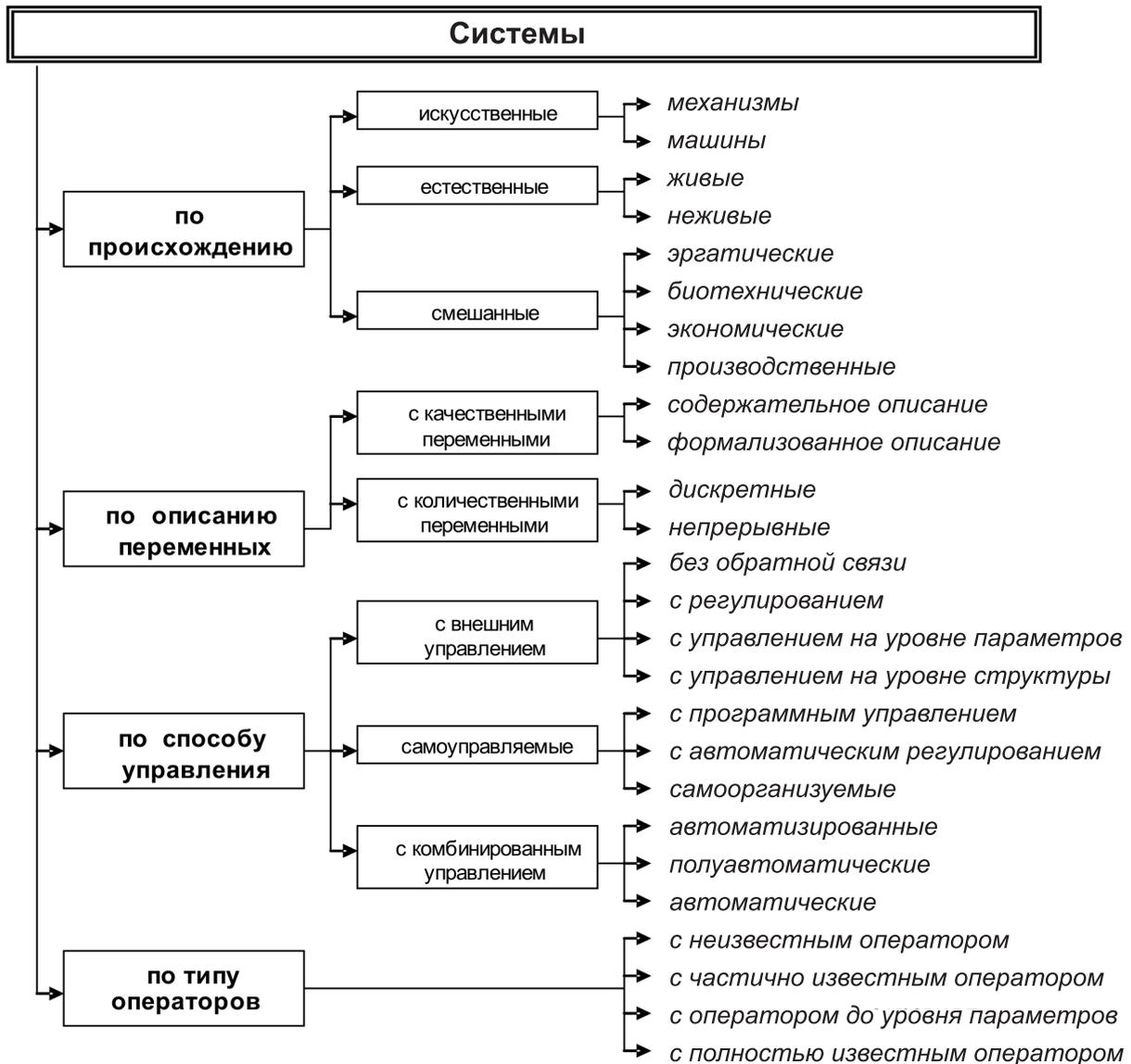


Рис. 5. Классификация систем

ную информацию для достижения оптимального состояния при начальной непосредственности и изменяющихся внешних условиях.

Иерархические системы – их элементы сгруппированы по уровням, вертикально соотнесенным один с другим; при этом элементы уровней имеют разветвляющиеся выходы. К преимуществам иерархических систем относятся: свобода локальных воздействий; отсутствие необходимости пропускать очень большие потоки информации через один пункт управления; повышенная надежность (при выходе из строя одного элемента системы вероятность выхода из строя всей системы весьма незначительна).

Таким образом, на основе имеющихся признаков классификации систему управления логистикой можно определить как смешанную, конкретную, открытую динамическую иерархическую систему с внешним управлением.

Понятия, характеризующие систему управления логистикой как совокупность подсистем, связанных иерархически (иерархическое представление).

В современной науке известны случаи, когда из двух различных принципов управления (централизованного и децентрализованного) возможен третий – иерархическое управление, в котором исключаются недостатки обоих принципов

и объединяются только преимущества [5]. Сущность иерархического управления заключается в выстраивании иерархической структуры по мере роста сложности управления, т. к. главной причиной иерархического управления является несоответствие между сложностью управляемого объекта и способностью управляющего органа получать и обрабатывать информацию.

Система управления логистикой имеет многоуровневую иерархическую структуру – от стратегического до тактического масштаба. Понятие многоуровневой иерархической структуры нельзя определить одной краткой и сжатой формулировкой. Поэтому дадим определение многоуровневой иерархической структуре перечислением присущих ей наиболее существенных свойств. К ним относятся:

- вертикальная соподчиненность;
- право вмешательства;
- взаимозависимость действий.

Вертикальная соподчиненность означает, что любая иерархия состоит из последовательно расположенных вертикально взаимодействующих подсистем, составляющих данную систему (вертикальная декомпозиция). Заметим, что как входы X , так и выходы Y могут быть распределены по всем уровням. Однако взаимодействие между уровнями происходит не только между каждыми двумя близлежащими уровнями, как для простоты показано на рис. 6.

Право вмешательства, или приоритет действий подсистем верхнего уровня, носит для низлежащих уровней обязывающий характер. В системах с детерминированным алгоритмом выполнения работы вмешательство обычно проявляется в виде изменения параметров подсистем низлежащего уровня. В системах с недетерминированным алгоритмом выполнения приоритет действий задает последовательный порядок получения решений на разных уровнях. Чтобы подчеркнуть значение приоритета в установлении порядка действий, элементы верхнего уровня называют «вышестоящими», а нижнего – «нижестоящими».

Взаимозависимость действий вышестоящих и нижестоящих уровней структуры. Хотя вмешательство (приоритет действий) направлено сверху вниз в виде отдачи приказов или команд, успешность функционирования системы и, фактически, элементов любого уровня зависит от поведения всех элементов системы. Так как само понятие приоритета подразумевает, что вмешательство предшествует действиям более низких уровней, успешность работы верхнего уровня зависит не только от осуществляемых им действий, но и от соответствующих реакций нижних уровней, точнее, от их суммарного эффекта. Поэтому можно считать, что качество работы всей системы обеспечивается обратной связью, т. е. реакциями на вмешательство, информация о которых направляется

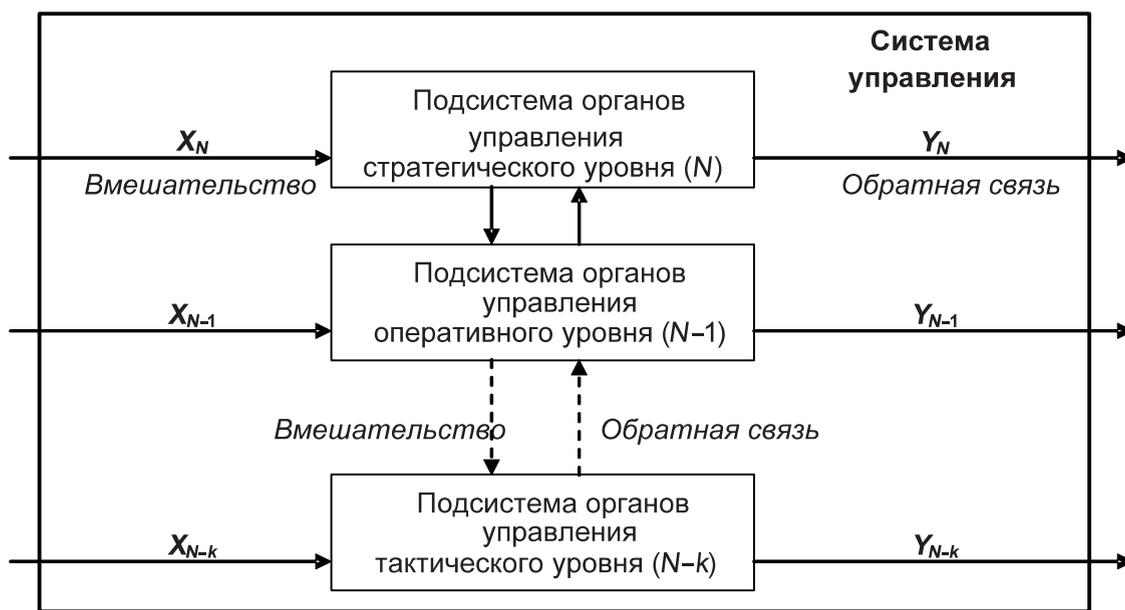


Рис. 6. Вертикальное взаимодействие между уровнями иерархий



ется снизу вверх. Такая взаимозависимость действий особенно очевидна в случае, когда обмен со средой происходит в основном (или исключительно) на самом нижнем уровне системы.

Для классификации иерархий вводятся три понятия уровней:

- 1) уровень описания, или абстрагирования;
- 2) уровень сложности управления;
- 3) организационный уровень.

Чтобы различать эти уровни, употребляются следующие термины: «страта», «слой» и «эшелон». Термин «уровень» является родовым, относящимся к любому из этих понятий. При описании системы управления логистикой используются все три понятия.

Страты. Уровни описания, или абстрагирования. Для каждого уровня иерархии существует ряд характерных особенностей и переменных, законов и принципов, с помощью которых описывается поведение системы. Чтобы такое иерархическое описание было эффективным, необходима как можно большая независимость моделей для различных уровней системы. Таким образом, процесс расчленения системы управления логистикой на уровни, характеризующие стратегические, оперативные и тактические аспекты ее функционирования, называется «стратифицированием системы управления логистикой», а сами уровни – «стратами» [2, 4]. На каждой страте в иерархии структур имеется свой собственный набор переменных, которые позволяют в значительной степени ограничить изучение только одной страты.

Слои. Уровни сложности управления. Почти в любой реальной ситуации управления существуют две предельно простые, но чрезвычайно важные особенности:

когда приходит время принимать решения, их принятие и выполнение нельзя откладывать;

неясность относительно последствий различных альтернативных действий и отсутствие достаточных знаний об имеющихся связях препятствуют достаточно полному формализованному описанию ситуации, необходимому для рационального выбора действий.

Эти два фактора приводят к основной дилемме управления: с одной стороны, необходимо действовать немедленно, с другой, прежде чем приступить к действиям, следует попытаться лучше понять ситуацию. При управлении в сложных ситуациях решение этой дилеммы ищут в иерар-

хическом подходе. Сложная проблема управления разбивается на семейство последовательно расположенных более простых подпроблем, так что решение всех подпроблем позволяет решить и исходную проблему. Такая иерархия называется «иерархией слоев управления», а вся система – «многослойной системой управления».

Многоэшелонные системы: организационные иерархии. Это понятие иерархии подразумевает, что

система состоит из семейства четко выделенных взаимодействующих подсистем;

некоторые из подсистем являются принимающими решения элементами;

элементы, принимающие решения, располагаются иерархически в том смысле, что некоторые из них находятся под влиянием или управляются другими решающими элементами. Уровень в такой системе называется «эшелоном». Такие системы называются «многоэшелонными», «многоуровневыми» или «многоцелевыми».

Для эффективного использования многоуровневой структуры существенно, чтобы элементам принятия решения была предоставлена некоторая свобода действий. Должно быть проведено рациональное распределение усилий по принятию решений между элементами различных уровней. Только при этом условии будет оправдано само существование иерархии. По характеру иерархического расположения образующих систему элементов различают следующие системы управлений:

одноуровневые одноцелевые системы;

одноуровневые многоцелевые системы;

многоуровневые многоцелевые системы.

Рассмотренные аспекты понятийного аппарата показывают, что система управления логистикой как объект исследования обладает следующими признаками:

состоит из множества, по крайней мере, двух элементов, расположенных иерархически;

элементы систем (подсистемы) взаимосвязаны посредством прямых и обратных связей;

система – это единое и неразрывное целое, являющееся целостной системой для нижестоящих иерархических уровней;

имеются фиксированные связи системы с внешней средой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белый, О.В.** Архитектура и методология транспортных систем: Монография [Текст]/О.В. Белый, О.Г. Кокаев, С.А. Попов.–СПб.: Элмор, 2002.
2. **Карташев, В.А.** Система систем: Очерки общей теории и методологии [Текст]/В.А. Карташев.–М.: Прогресс-Академия, 1995.
3. **Комаров, М.П.** Современные методы принятия решений: Монография [Текст]/М.П. Комаров.–СПб.: ВМА, 1998.
4. **Лэддон, Л.С.** Оптимизация больших систем [Текст]/Л.С. Лэддон. –М.: Наука, 1975.
5. **Меньков, А.В.** Теоретические основы автоматизированного управления [Текст]/А.В. Меньков.–М.: МГУП, 2002.
6. **Хейт, Ф.** Математическая теория транспортных потоков [Текст]/Ф. Хейт.–М.: Мир, 1966.

ФОРМАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПИРАМИДАЛЬНОЙ СОРТИРОВКИ НА ЯЗЫКЕ СИ-0

Сортировка – самая известная проблема теоретической информатики. Алгоритмы сортировки используются во многих реальных приложениях, например, таких, как организация СУБД. Из-за невысокой вычислительной сложности и отсутствия затрат на выделение дополнительной памяти под временное хранение данных широкое распространение получила пирамидальная сортировка [1]. Корректность обобщенного алгоритма (т. е. в котором опускаются несущественные детали реализации) была показана во многих ранних источниках [2], в то время как корректность его программного исполнения в научной литературе практически не обсуждалась.

В целом проверка корректности программного кода (*верификация*) является нетривиальной задачей. Различают два принципиальных подхода – динамический и статический [3]. Динамическая верификация подразумевает тестирование программы для различных входных данных. Очевидно, что проверить сложную систему для всех возможных входов и состояний невозможно, т. к. количество тестов имеет экспоненциальную зависимость от размера входа. Как следствие, динамическая верификация не может гарантировать отсутствие ошибок в программе.

Формальная верификация, относящаяся к статическим методам, реализует альтернативный подход – посредством формальной логики устанавливается соответствие результата выполнения программы представленной *спецификации* (набору формализованных утверждений, описывающих результат). Как правило, проведение формального доказательства является сложной задачей даже для малых программ. Именно поэтому применяются специализированные интерактивные среды, такие, например, как PVS, Isabelle, Coq, в которых

ход доказательства отслеживается и проверяется автоматизированными средствами.

Цель данной статьи – выполнение формального доказательства корректности *действующего программного кода* пирамидальной сортировки. В отличие от авторов [4], которые показали корректность алгоритма для целочисленного типа данных с использованием интерактивной среды верификации Coq, нами выполнена верификация пирамидальной сортировки массивов содержащих элементы *произвольного* типа. Для написания кода применялся язык Си-0 [5] являющийся подмножеством языка Си. Работа включала такие этапы, как составление формальной спецификации, написание программного кода и его перевод в среду верификации Isabelle/HOL, проведение доказательств, устанавливающих соответствие между спецификацией алгоритма и его реализацией. Каждый из перечисленных этапов описан в последующих разделах статьи.

Верификация программного кода

Под *формальной верификацией* программного кода понимается процесс доказательства или опровержения соответствия программной реализации ее спецификации при помощи формализованных методов и средств. В качестве среды верификации в данной статье использовалось интерактивное некоммерческое приложение Isabelle [6]. В сравнении с существующими программно-ориентированными анализаторами, такими, как Frama-C [7], данный инструмент при помощи математического аппарата логики высшего порядка (*higher-order logic, HOL*) позволяет не только показать отсутствие элементарных ошибок в коде (переполнение, обращение к нулевому указателю, деление на ноль), но и составить предикаты,

описывающие принцип работы программы на *абстрактном уровне*. Кроме того, данное приложение поставляется с обширным набором вспомогательных теорий, облегчающих процесс основного доказательства. Формальная корректность доказательства программ выбранным методом с использованием Isabelle/HOL показана в [8].

Верификация программы с использованием среды Isabelle/HOL **требует выполнения следующих шагов:**

1. создание неформальной спецификации программы, словесного описания результата ее выполнения;
2. реализация программы на выбранном языке программирования;
3. перевод исходного текста программы в язык среды верификации;
4. создание формальной спецификации;
5. создание инвариант циклов и условий завершения программы;
6. автоматическая генерация условий верификации;
7. выполнение интерактивного пошагового доказательства;
8. анализ результатов.

При выполнении доказательства определенные изменения могут быть внесены в спецификацию, инварианты и условия завершения. Однако изменение программного кода на этом этапе не допускается.

Программный код пирамидальной сортировки выполнялся на языке Си-0 (шаг 2) являющемся подмножеством ANSI Си. Данный язык имеет ряд синтаксических ограничений [5], которые не влияют на функциональность создаваемого программного кода, но заметно упрощают формальное моделирование и ход доказательства. Дополнительным аргументом в пользу данного языка явилось наличие Си-0 компилятора, корректность которого была показана формально. Следует отметить, что на сегодняшний день активно ведутся исследования в области формальной верификации кода, написанного на языке Си++ [9, 10]. Однако отсутствие полной формальной семантики языка, сложность и обилие механизмов программирования, включающих как низкоуровневые операции с памятью, так и абстрактную объектно-ориентированную модель, являются факторами, сдерживающими использование данных теоретических исследований на практике.

Формальная спецификация алгоритма, ин-

варианты циклов и условия завершения оформлялись с использованием аксиоматической семантики в стиле Хоара (*Hoare logic*) (шаги 4, 5) представляющей собой набор аксиом и правил, при помощи которых формулируются утверждения о корректности выполнения программного кода [11, 12]. Пусть Σ – это *пространство состояний* (множество значений локальных и глобальных переменных программы), \mathbf{B} – *булево множество* $\{0, 1\}$, тогда *утверждение* A_Σ над пространством состояний – это предикат вида $A_\Sigma = \{\alpha \mid \alpha : \Sigma \rightarrow \mathbf{B}\}$. Утверждения позволяют описывать свойства и зависимости переменных, присутствующих в программе, при этом утверждение $A \in A_\Sigma$, описывающее пространство состояний в начальный момент выполнения программы, называется *предусловием*, а утверждение $B \in A_\Sigma$, описывающее результат выполнения программы, называется *постусловием*. Основопологающим элементом семантики Хоара является тройка Хоара (*Hoare triplet*) $\{A\}P\{B\}$, представляющая собой функцию:

$$A_\Sigma \times 2^{\Sigma \times \Sigma} \times A_\Sigma \rightarrow \mathbf{B},$$

где $P \in 2^{\Sigma \times \Sigma}$ соответствует программному коду. Отметим, что пространство состояний, пред- и постусловие вместе образуют *формальную спецификацию* программы.

Автоматическая генерация условий верификации (шаг 6) заключается в том, что тройка Хоара преобразуется в набор логических утверждений. Для этих целей в среде верификации Isabelle/HOL присутствует инструмент *VCG* [13]. Процесс доказательства (шаги 7, 8) сводится к построению последовательности элементарных логических правил, показывающих или опровергающих справедливость сгенерированных условий верификации.

Алгоритм пирамидальной сортировки

Пирамидальная сортировка (*heap sort*) – классический алгоритм, базирующийся на сравнении элементов входного массива. К достоинствам алгоритма можно отнести то, что при его выполнении не выделяется дополнительная память, и при этом худшее время выполнения составляет $O(n \log n)$, где n – размер входного массива. В основе пирамидальной сортировки лежит использование *двоичного сортирующего дерева* (*binary heap*), в котором вершины имеют не более двух наследников. За каждой вершиной закреплено некото-

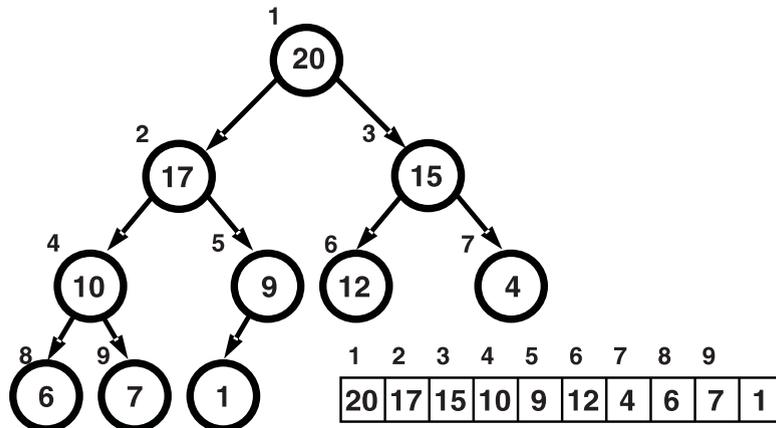


Рис. 1. Сортирующее дерево и его представление в виде массива

рое значение – *ключ*. Ключ должен быть меньше или равным ключу родительской вершины – это так называемое *основное свойство дерева (heap property)*. Как следствие, корневая вершина имеет максимальный по значению ключ. Сортирующее дерево реализуется линейным массивом. Вершина дерева, представленная элементом массива с индексом j , имеет родительскую вершину, представленную элементом массива на позиции $[j/2]$, а наследующие вершины (правая и левая) должны быть расположены на позициях $2j$ и $2j+1$, как показано на рис. 1.

Обобщенный алгоритм пирамидальной сортировки *HeapSort()* состоит из двух шагов (рис. 2):

1. для входного массива создается сортирующее дерево (строки 1–2);
2. в цикле из дерева удаляется корневая вершина, затем процедура *SiftDown()* (строки 3–5) восстанавливает основное свойство дерева.

Процедура *SiftDown()* «просеивает» элемент, начиная с позиции корневой вершины *root* вниз по структуре дерева до тех пор, пока свойство дерева не восстановится. Входной параметр *bottom* определяет индекс последней вершины сортиру-

```

procedure HeapSort(A, N)
1:  for i = N/2 to 0
2:    SiftDown(A, i, N)
3:  for i = N to 1
4:    swap(A[0], A[i])
5:    SiftDown(A, 0, i-1)

procedure SiftDown(A, root, bottom)
6:  while root * 2 ≤ bottom
7:    if cmp(A[root * 2 + 1], A[root * 2])
8:      child = root * 2
9:    else
10:     child = root * 2 + 1
11:   if cmp(A[root], A[child])
12:     swap(A[root], A[child])
13:     root = child
14:   else
15:     break
  
```

Рис. 2. Алгоритм пирамидальной сортировки

ющего дерева. Первым действием (строки 7–10) определяется, какая из двух наследующих вершин имеет больший ключ. Затем индекс этой вершины заносится в переменную *child*. В строке 11 ключ вершины *child* сравнивается с ключом вершины *root*. Если свойство сортирующего дерева не соблюдается, т. е. $A[root] < A[child]$, вершины меняются местами (строки 12–13). Так как после обмена свойство может не выполняться на нижних уровнях, то на следующей итерации цикла **while** осуществляется проверка для поддеревя с корневой вершиной *child*.

Следует обратить внимание, что тип данных входного массива алгоритмом не оговаривается. Предполагается, что для выбранного типа имеется процедура *cmp(a,b)*, которая реализует отношение «строго меньше», т. е. $a < b$. Соответственно, если процедура сравнения определена для некоторого типа данных, то становится возможным использование алгоритма для сортировки массива с элементами данного типа.

Вспомогательные предикаты

Прежде чем составлять формальную спецификацию алгоритма, введем ряд вспомогательных предикатов.

Цель алгоритма сортировки – получение такой перестановки элементов массива *A*, при которой для любой пары соседних элементов с индексами *j* и *j+1* выполняется условие $A[j] \leq A[j+1]$. Данное утверждение формально записывается следующим предикатом:

$$\text{is_sorted}(A, i, N, C) := \forall j \geq 0. [N \geq 1 \wedge j \geq i \wedge j < N] \Rightarrow \neg C(A[j+1], A[j]), \quad (1)$$

где *i* определяет индекс элемента, с которого начинает выполняться условие сортировки; *N* – общее количество элементов в массиве, $C(a, b) := a < b$ – булева функция сравнения. Предикат (1) далее именуется *критерием сортировки*. Принимая во внимание, что алгоритм сортировки должен выполняться корректно для произвольного типа данных, функция сравнения *C* для некоторого *фиксированного* типа должна обладать следующим набором свойств:

$$\text{not_commutative}(C) := \forall a, b. C(a, b) \rightarrow \neg C(b, a);$$

$$\text{not_reflexive}(C) := \forall a. \neg C(a, a);$$

$$\text{transitive}(C) := \forall a, b, c. [C(a, b) \wedge C(b, c)] \Rightarrow C(a, c).$$

Указанные свойства объединяются в предикате *valid_cmp_operator*

$$\begin{aligned} \text{valid_cmp_operator}(C) := & \text{not_commutative}(C) \wedge \\ & \text{not_reflexive}(C) \wedge \\ & \text{transitive}(C). \quad (2) \end{aligned}$$

Основное свойство сортирующего дерева выражается предикатом *is_heap()*:

$$\begin{aligned} \text{is_heap}(A, i, j, N, C) := & \forall k. [k \geq 2i \wedge k \leq j \wedge j < N] \Rightarrow \\ & \Rightarrow \neg C(A[\lfloor k/2 \rfloor], A[k]). \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь *i* и *j* задают диапазон индексов массива *A*, в пределах которых линейный массив является представлением сортирующего дерева. Аналогичным образом введем предикат *is_heap_except(A, i, j, k, N, C)*, который определяет соответствие массива сортирующему дереву за исключением элемента на позиции *k*.

Спецификация и программная реализация алгоритма

Приведем программную реализацию и спецификацию процедур, реализующих пирамидальную сортировку. Пространство состояний Σ каждой процедуры делится на глобальное и локальное. Глобальное состояние Σ_0 разделяется всеми процедурами в программе. Во время выполнения программы значения переменных, входящих в пространство состояний Σ , могут изменяться.

При составлении предусловия процедуры необходимо ссылаться на начальные значения переменных, в то время как в постусловии потребуются как начальные, так и конечные значения. Чтобы различать их условимся, что имя переменной с апострофом (например, *bottom'*) описывает ее значение на момент завершения процедуры, без апострофа – на момент вызова. Чтобы различать в спецификации локальные переменные, имеющие одинаковые названия в разных процедурах, их имена будут расширены названиями функций (например, *sD_arr*, *hS_arr*).

Процедура siftDown(). Программная реализация процедуры *siftDown()* на языке Си-0 представлена на рис. 3.

В качестве входных параметров процедура принимает указатель на входной массив *arr*, индексы *root* и *bottom*, в пределах которых после завершения процедуры элементы массива будут представлять сортирующее дерево. В Си-0 (так же как и в ANSI Си) не предусмотрено стандартной возможности программирования кода с

```

1 bool siftDown (struct array* arr, unsigned int root, unsigned int bottom)
2 {
3     bool done;
4     bool rescomp;
5     unsigned int maxChild;
6     ANY_TYPE temp;
7     done = false;
8     while (( root*2u <= bottom) && ( !done ))
9     {
10        if(root * 2u == bottom)
11            maxChild = root * 2u;
12        else
13        {
14            rescomp = cmp(arr->numbers[root*2u + 1u], arr->numbers[root*2u]);
15            if (rescomp == true)
16                maxChild = root * 2u;
17            else
18                maxChild = root * 2u + 1u;
19        }
20        rescomp = cmp(arr->numbers[root], arr->numbers[maxChild]);
21        if( rescomp == true )
22        {
23            temp = arr->numbers[root];
24            arr->numbers[root] = arr->numbers[maxChild];
25            arr->numbers[maxChild] = temp;
26            root = maxChild;
27        }
28        else
29            done = true;
30    }
31    return true;
32 }

```

Рис. 3. Программная реализация процедуры *siftDown()*

произвольным типом данных, поэтому типовая параметризация в тексте программы реализовывалась путем определения типа ANY_TYPE следующим образом:

```

#define MAXNUM 10000
#define ANY_TYPE int
struct array {ANY_TYPE numbers[MAXNUM];}

```

Пространство состояний для процедуры *siftDown()* имеет вид:

$$\Sigma = \Sigma_0 \cup \{ sD_arr, sD_root, sD_bottom, sD_done, sD_rescomp, sD_temp, sD_maxChild, sD_res_bool \}.$$

Предусловие процедуры *pre_sD* включает следующие предикаты:

pre_sD :=

$$sD_bottom > sD_root \quad \wedge \quad (4a)$$

$$is_heap(sD_arr, sD_root+1, sD_bottom, size(sD_arr), cmp) \quad \wedge \quad (4б)$$

$$sD_arr \neq Null \quad \wedge \quad (4в)$$

$$sD_bottom < size(sD_arr) \quad \wedge \quad (4г)$$

$$valid_compare_operator(cmp) \quad \wedge \quad (4д)$$

$$in_range(sD_bottom * 2+1) \quad \wedge \quad (4е)$$

Условие (4а) устанавливает отношение между начальным и конечным индексами массива. Следующий предикат объявляет, что элементы входного массива, начиная с индекса sD_root+1 , являются действительным представлением сортирующего дерева. Условия (4в) и (4г) оговаривают, что указатель на входной массив не нулевой, и конечный индекс sD_bottom не выходит за границы массива. Предикат (4д) устанавливает соответствие используемой функции $cmp()$ тре-

$$post_sD := \text{is_heap}(sD_arr', sD_root, sD_bottom, \text{size}(sD_arr'), cmp) \quad (5a)$$

$$\forall k. (k \geq 0 \wedge k < sD_root) \vee (k > sD_bottom \wedge k < \text{size}(sD_arr')) \Rightarrow sD_arr[k] = sD_arr'[k] \quad (5б)$$

$$sD_arr \cong sD_arr' \quad (5в)$$

Предикат is_heap гарантирует корректность работы процедуры $\text{siftDown}()$, по окончании которой весь входной массив в диапазоне индексов $[sD_root, sD_bottom]$ является представлением сортирующего дерева. Кроме того, элементы входного массива, не входящие в указанный диапазон, остались на своих прежних позициях (5б), и выходной массив является *перестановкой* исходного (данное отношение обозначено « \cong ») (5в),

буемым свойствам отношения «строго меньше». Последнее ограничение (4е) определяет, что входные параметры процедуры выбраны таким образом, что при выполнении арифметических вычислений не произойдет *переполнение*, т. е. результат будет находиться в диапазоне значений выбранного типа данных.

Постусловие $post_sD$ составлено в виде следующего логического выражения:

т. е. наборы элементов обоих массивов совпадают.

В дополнении к пре- и постусловию необходимо сформулировать условие завершения процедуры, которое представляет собой целочисленное выражение, уменьшающееся на *каждой* итерации цикла. Этим гарантируется конечность общего числа итераций. Условие завершения для процедуры $\text{siftDown}()$ имеет вид:

$$\text{Termination_measure} := \text{if } sD_root * 2 \leq sD_bottom \wedge \neg sD_done \text{ then } (1 + sD_bottom) - 2 * sD_root \text{ else } 0$$

Процедура $\text{heapSort}()$. Программный код процедуры $\text{heapSort}()$ представлен на рис. 4. В качестве входных параметров она принимает массив arr и его размер $array_size$. Пространство состояний задано следующим множеством:

$$\Sigma = \Sigma_0 \cup \{ hS_arr, hS_array_size, hS_i, hS_temp, hS_restemp, hS_res_bool \}.$$

Предусловие pre_hS процедуры имеет вид:

$$pre_hS := hS_arr \neq Null \quad (6a)$$

$$\text{valid_compare_operator}(cmp) \quad (6б)$$

$$\text{in_range}(hS_array_size * 2 + 1) \quad (6в)$$

$$hS_array_size = \text{size}(hS_arr) \quad (6г)$$

Условия (6а), (6б), (6в) аналогичны предусловиям (4в), (4д), (4е) процедуры $\text{siftDown}()$. Выражение (6г) показывает, что переменная $array_size$ действительно содержит длину массива.

```

1 bool heapSort (struct array* arr, unsigned int array_size)
2 {
3     unsigned int i;
4     ANY TYPE temp;
5     bool restemp;
6     i = ((array_size + 1u)/2u);
7     if (1u < array_size)
8     {
9         while (i > 0u)
10        {
11            restemp = siftDown(arr, i - 1u, array_size - 1u);
12            i = i - 1u;
13        }
14        i = array_size - 1u;
15        while (1u <= i )
16        {
17            temp = arr->numbers[0u];
18            arr->numbers[0u] = arr->numbers[i];
19            arr->numbers[ i] = temp;
20            if ( i - 1u != 0u)
21                restemp = siftDown(arr, 0u, i - 1u);
22            i = i - 1u;
23        }
24        return true;
25 }

```

Рис. 4. Программная реализация процедуры *heapSort()*

Результат работы процедуры пирамидальной сортировки записывается в виде следующего постусловия *post_sD*

$$post_sD := \text{is_sorted}(hS_arr', 0, hS_array_size, cmp) \quad \wedge \quad (7a)$$

$$hS_arr \cong hS_arr' \quad (7b)$$

Условие (7a) гарантирует, что по завершении *heapSort()* входной массив будет представлять отсортированную последовательность входящих в него элементов, при этом выходной массив является перестановкой входного (7b).

Условия завершения для обоих циклов процедуры *heapSort()* тривиальны и имеют вид
Termination_measure := *hS_i*

Инварианты циклов и условия корректности

Следующим шагом сформулируем инварианты циклов. Инвариант *inv_sD* цикла в процедуре *siftDown()* имеет вид

$$inv_sD := sD_root * 2 \leq sD_bottom \wedge \neg sD_done \Rightarrow \text{is_heap_except}(sD_arr, sD_root', sD_bottom, sD_root, \text{size}(sD_arr), cmp) \quad \wedge \quad (8a)$$

$$sD_root * 2 > sD_bottom \vee sD_done \Rightarrow \text{is_heap}(sD_arr, sD_root', sD_bottom, \text{size}(sD_arr), cmp) \quad \wedge \quad (8b)$$

$$sD_root \geq sD_root' \quad \wedge \quad (8b)$$

$$\forall k. (k \geq 0 \wedge k < sD_root) \vee$$

$$(k > sD_bottom \wedge k < size(sD_arr)) \Rightarrow$$

$$sD_arr[k] = sD_arr'[k] \quad \wedge \quad (8г)$$

$$sD_arr \neq Null \quad \wedge \quad (8д)$$

$$valid_compare_operator(cmp) \quad \wedge \quad (8е)$$

$$sD_arr \cong sD_arr' \quad (8ж)$$

Первое условие гарантирует, что, в случае пока цикл не завершился, входной массив является сортирующим деревом, за исключением просеиваемого элемента. Второй предикат распространяет свойство дерева на весь переданный массив по окончании работы цикла. Условие (8в) утверждает, что просеивание выполняется от больших элементов к меньшим, условия (8д–ж) аналогичны условиям (4в), (4д), (5б) соответственно.

Инвариант первого цикла процедуры *heapSort()* имеет вид:

$$inv1_hS :=$$

$$is_heap(hS_arr, hS_i, hS_array_size-1, hS_array_size, cmp) \quad \wedge \quad (9а)$$

$$hS_i < hS_array_size \quad \wedge \quad (9б)$$

$$hS_arr \neq Null \quad \wedge \quad (9в)$$

$$valid_compare_operator(cmp) \quad \wedge \quad (9г)$$

$$in_range(hS_array_size * 2+1) \quad \wedge \quad (9д)$$

$$hS_arr \cong hS_arr' \quad (9е)$$

Условие (9а) гарантирует, что часть массива, начиная от элемента с индексом *hS_i*, является сортирующим деревом. Условие (9б) ограничивает значение *hS_i* сверху.

Инвариант второго цикла *inv2_hS* включает следующие условия:

$$inv2_hS := \quad (10а)$$

$$is_heap(hS_arr, 0, hS_i, hS_array_size, cmp) \quad \wedge$$

$$is_sorted(hS_arr', hS_i+1, hS_array_size, cmp) \quad \wedge \quad (10б)$$

$$\forall l. (l \geq 0 \wedge l < hS_i+1) \wedge (hS_i+1) < hS_array_size \Rightarrow \neg cmp(hS_arr[i+1], hS_arr[l]) \quad \wedge \quad (10в)$$

$$hS_i < hS_array_size \quad \wedge \quad (10г)$$

$$hS_arr \neq Null \quad \wedge \quad (10д)$$

$$valid_compare_operator(cmp) \quad \wedge \quad (10е)$$

$$in_range(hS_array_size * 2+1) \quad \wedge \quad (10ж)$$

$$hS_arr \cong hS_arr' \quad (10з)$$

Предикат *is_heap()* требует, чтобы необработанная часть массива являлась сортирующим деревом, а предикат *is_sorted* гарантирует, что измененная часть массива представляет отсортированную последовательность. Условие (10в) показывает, что любой непросеенный элемент меньше, чем наименьший из просеенных. Данное условие необходимо, чтобы показать, что на каждой итерации цикла фиксируется наибольший элемент массива. Остальные условия аналогичны рассмотренным ранее.

При помощи инструмента VCG для процедуры *siftDown()* было сгенерировано три условия верификации:

- 1) $pre_sD \Rightarrow inv_sD[sD_done := false];$
- 2) $inv_sD_i \wedge (sD_root * 2 \leq sD_bottom) \Rightarrow inv_sD_{i+1};$
- 3) $inv_sD \wedge \neg(sD_root * 2 \leq sD_bottom) \Rightarrow post_sD.$

Для процедуры *heapSort()* было сгенерировано пять условий:

- 1) $pre_hS \wedge hS_array_size > 1 \Rightarrow inv1_hS[hS_i := (hS_array_size + 1) / 2];$
- 2) $inv1_hS_i \wedge (hS_i > 0) \Rightarrow inv1_hS_{i+1};$
- 3) $inv1_hS \wedge (hS_i \leq 0) \Rightarrow inv2_hS[hS_i := hS_array_size - 1];$
- 4) $inv2_hS_i \wedge (hS_i > 0) \Rightarrow inv2_hS_{i+1};$
- 5) $inv2_hS \wedge (hS_i \leq 0) \Rightarrow post_hS.$

Доказательство условий корректности

Рассмотрим доказательство корректности сгенерированных условий на примере условия 2 процедуры *heapSort()*. В теле первого цикла процедуры, описываемого инвариантом (9), происходит вызов процедуры *siftDown()* с входными параметрами $sD_arr = hS_arr$, $sD_root = (hS_i - 1)$, $sD_botom = (hS_array_size - 1)$ и декремент счетчика hS_i . Требуется показать, что инвариант цикла остается верным после выполнения одной итерации цикла. Условия (9б–г) напрямую следуют из инварианта предыдущей итерации цикла. Условие (9а) выполняется благодаря постуловию (5а) процедуры *siftDown()* (с учетом декремента hS_i). Для вывода условия (9д) воспользуемся условиями (5б), (5в) и свойством отношения перестановки элементов последовательности. Необходимо показать, что предусловие (4) вызываемой процедуры *siftDown()* выполняется. После подстановки входных параметров, все условия из (4) напрямую следуют из инварианта (9).

Доказательство корректности программы сортировки проводилось в среде Isabelle/HOL. При

выполнении основного доказательства потребовалось также показать ряд вспомогательных лемм, описывающих свойства целочисленного деления, функции логарифма, перестановки элементов последовательности. Общий объем доказательств составил 74 леммы (см. табл.).

Статистические данные объема доказательств, выполненных в Isabelle/HOL

	<i>siftDown</i>	<i>heapSort</i>	Другие	Итого
Леммы	3	5	66	74
Команды	651	461	799	1911

В статье рассмотрен вопрос формальной верификации Си-0 реализации алгоритма пирамидальной сортировки. Исходные коды были переведены в среду верификации Isabelle/HOL, составлена формальная спецификация алгоритма, соответствие которой реализации было доказано посредством пошагового доказательства. Удалось формально показать корректность действующего программного кода алгоритма сортировки для массива с элементами произвольного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кормен, Т.** Алгоритмы построение и анализ [Текст]/Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест.–М.: МЦНМО, 2000.
2. **Knuth, D.** The Art of Compute Programming [Текст]/D. Knuth//Sorting and Searching.–1997.–Vol.3.–Addison-Wesley.
3. **Adrion, W.R.** Validation, verification, and testing of computer software [Текст]/W.R. Adrion, M.A. Branstad, J.C. Cherniavsky//ACM Comp. Surv.–1982.–Vol.14 (2).–P. 159–192.
4. **Filliatre, J.C.** Certification of sorting algorithms in

- the system Coq [Текст]/J.C. Filliatre, N. Magaud//Theorem Proving in HOL: Emerging Trends, 1999.
5. **Leinenbach, D.** Towards the formal verification of a C0 compiler: code generation and implementation correctness [Текст]/D. Leinenbach, W. Paul, E. Petrova// In 3rd Int. IEEE conf. on Software Eng. and Formal Methods.–2005.–P. 2–11.
6. **Nipkow, T.** Isabelle/HOL: A proof assistant for higher-order logic [Текст]/T. Nipkow, L.C. Paulson, M. Wenzel// Lecture Notes on Computer Science.–2002. 2283.
7. <http://frama-c.com/> [Электронный ресурс].

8. **Schirmer, N.** Verification of Sequential Imperative Programs in Isabelle/HOL [Текст]/N. Schirmer//PhD thesis. –Technische Universität München, 2006.

9. **Norrish, M.** A formal Semantics for C++ [Текст]/M. Norrish//Technical report, NICTA.–2008. –P. 1–125.

10. **Cohen, E.** A Precise Yet Efficient Memory Model For C [Текст]/E. Cohen, M. Moskal, W. Schulte [et al.]//4th International Workshop on Systems Software Verification (SSV2009)–2009.–P. 20–29.

11. **Hoare, C.** Procedures and parameters: An axiomatic approach [Текст]/C. Hoare//Lecture Notes in Mathematics–1971.–Vol. 188.–P. 102–116,

12. **Непомнящий, В.А.** На пути к верификации С-программ. Язык C-Light и его трансформационная семантика [Текст]/В.А. Непомнящий, И.С. Ануреев, А.В. Промский//УкрПРОГ–2006.–С. 23–25.

13. **Mechta, F.** Proving pointer programs in higher-order logic [Текст]/F. Mechta, T. Nipkow.–2003.–Vol. 2741.–P. 121–135.

УДК 004.658.6

И.В. Бутенко, С.М. Устинов

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕПОЗИТОРИЯ МЕТАДАНЫХ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В современных информационных системах накоплено большое количество данных, и извлечение нужной информации из таких систем часто связано с недопустимыми затратами времени и средств. Для того чтобы добыть информацию, необходимо знать, какие именно данные уже есть, где они находятся и как могут быть получены.

В связи с этим при создании новых информационных систем разработчики используют аппарат, базирующийся на метаданных (МД). Он предоставляет возможности описания и манипулирования метаданными в рамках либо общей модели CWM (Common Warehouse Metamodel), сформированной группой OMG (Object Management Group), либо модели конкретной метасистемы (МС).

Этим вопросам посвящены многочисленные работы ученых как в нашей стране, так и за рубежом (Д. Марко, А. Танненбаум, Р. Кимбалл, Б. Инмон), а также такие программные продукты, как Oracle Data Integrator, IBM Information Server, SAP BusinessObjects Metadata Manager, CA ERwin Saphir Option, SAS® Metadata Server.

Однако в настоящее время существует большое количество информационных систем, в которых отсутствует описание МД, используемых в системе, либо такие данные не являются полными. Такие системы или развиваются с большим трудом (очень большие вложения при минимальных результатах) или не развиваются вовсе, поскольку отсутствует информация не только о том,

что, где и как хранится, но и по каким алгоритмам работает. Часто судьба таких систем – это медленное умирание. Рядом с ними строятся хранилища данных, которые не достраиваются в силу той же проблемы.

Особую потребность в МД испытывают быстро меняющиеся информационные системы. Например, такими системами являются банковские, бухгалтерского учета и аналитические.

Выход из создавшегося положения – построение МС на основе уже существующих информационных систем. Она должна позволять сформировать общее информационное пространство и обеспечивать дальнейшее развитие системы. Это, в свою очередь, требует разработки сопутствующих методов, алгоритмов и программного обеспечения. Решению указанных вопросов и посвящена данная статья.

Формализация задачи

Остановимся более подробно на логической архитектуре системы и возможностях, которые она должна предоставлять. Предлагаемая МС, по сути, является расширенным репозиторием метаданных (рис. 1). В ней хранится информация о бизнес-процессах, бизнес-логика, описания структур и полей существующей базы данных (БД).

Из внешних источников метаданные загружаются в МС. Наиболее эффективна данная система именно для разнородных информационных си-

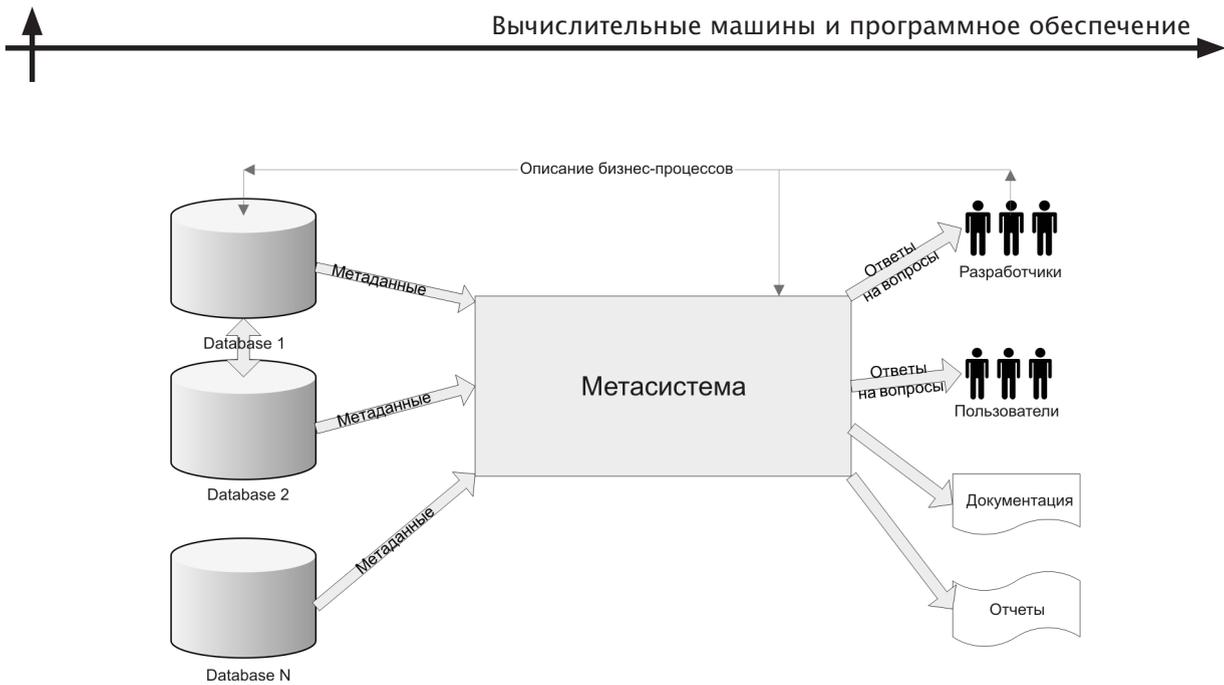


Рис. 1. Схема взаимодействия в рамках метасистем

стем, где данные лежат в различных источниках как связанных друг с другом, так и автономных. В МС попадают не только описания структур источников, но и комментарии к ним, которые могут подхватываться из скриптов создания самих структур, загружаться из документации и вводиться пользователем вручную. В процессе работы с МС разработчики или пользователи формируют запросы и получают отчеты. В качестве разработчика может выступать как непосредственно программист, так и бизнес-аналитик, которому для осознания того, что и как необходимо сделать, нужна информация о том, что уже сделано. На основе ответов разработчик может вносить изменение в описание уже существующих бизнес-процессов. При этом информация о внесении изменений тут же попадает в саму МС. Таким образом, данные в ней обновляются не периодически, а постоянно, как только произошли изменения во внешнем источнике. Такой механизм дает пользователям уверенность в том, что они работают с актуальной информацией, и им не нужно тратить дополнительное время и средства на проверку актуальности данных.

Основным пользователем такой МС будет Разработчик, человек, которому необходимо внести изменение в бизнес-логику. Метасистема призвана облегчить разработку новых возможностей описываемых систем, что, в свою очередь, позволит сократить трудоемкость, и, соответственно, стоимость самой разработки. Таким образом, программный продукт, который использует МС, становится более конкурентоспособным на рынке.

Другой вид использования такой системы – ответы на вопросы о том, где именно и как в системе можно выполнить те или иные действия. Также эта система выполняет функцию поддержки процесса документирования проекта. Необходимую информацию пользователь может вывести в качестве печатной версии отчета.

Разрабатываемая МС должна обеспечить решение следующих задач:

- построение единого хранилища и описание всех объектов существующей Системы;
- возможность классификации и поиска необходимой информации;
- обеспечение отслеживания версий объектов БД на сервере;
- повышение уровня языка доступа к данным – возможность строить запросы из МС;
- создание базиса для построения Федеративных систем или Хранилища данных (ХД).

Метасистема строится при следующих ограничениях на область дальнейшего применения.

1. *Ориентация на SQL-ориентированные Системы.* В качестве стандарта для таких систем есть язык написания запросов: **Ansi SQL**. В данной статье применяется расширение стандарта Ansi SQL, используемое в Microsoft SQL Server. При этом, в силу специфики МС, алгоритмы наполнения информацией МС могут быть приведены к любому расширению языка T-SQL без больших затрат (для некоторых расширений без доработок).

2. *Автоматическое наполнение МС производится только за счет информации, содержа-*

щейся в БД Системы. Такое ограничение позволяет не сужать область применения МС. Так как создается продукт, который не ориентирован на конкретную СУБД, необходимо сделать его независимым от конкретной реализации клиентского приложения. К сожалению, не существует общего стандарта на написание такого рода приложений. Поэтому в предлагаемую МС загружается только серверная часть логики приложения.

Таким образом, в статье предлагается строить репозиторий МД, в качестве исходных данных для которого являются МД, загружаемые из уже существующих информационных систем. Следовательно, загружаться будут только актуальные данные – то, чего нет в системе, не может попасть в репозиторий.

Реализация данного подхода может быть формализована в виде методики, включающей следующие этапы.

Разработка структуры БД МС. Необходимо разработать структуру самой базы данных МС, что, в свою очередь, требует построить модель объектов, хранящихся в системе.

Разработка модели классификатора как элемента структуры базы данных МС.

Загрузка метаданных. Необходимо разработать алгоритм загрузки данных в структуру данных, предложенную на предыдущем этапе. С этой целью предлагается модель загрузки объектов в МС.

Построение дерева классификатора. Для качественного функционирования репозитория МД необходима подсистема настройки классификаторов. Это требует построения модели, опирающейся на модель данных из следующего раздела.

Дальнейшее использование (организационные мероприятия). Максимально эффективное использование МС подразумевает выполнение целого ряда организационных мероприятий.

Выбор средств реализации МС. Для реализации МС необходимо выбрать следующие программные средства: СУБД, средства загрузки данных, средства реализации клиентского приложения.

Рассмотрим последовательно каждый из этапов построения МС.

Разработка базы данных метасистемы

Разработка модели объектов и классификаторов. Из требований к разрабатываемой МС следует, что в качестве объектов рассматривают-

ся основные сущности БД: таблицы, хранимые процедуры (ХП), колонки таблиц, параметры процедур, типы данных и их описания.

Любой объект может быть описан в следующем виде:

$$O = \langle n, t, \{O\}, P, C \rangle,$$

где n – имя объекта (в терминах БД); t – тип объекта (таблица, ХП, колонка, параметр ХП); P – параметры объекта, необходимые (и, может быть, достаточные) для построения объекта O на базе; C – описание объекта.

Описание объекта может включать описание других объектов (таблица описывается через колонки).

P – вектор четко заданной последовательности параметров.

$P = \{p_i\}$, где p_i – значение параметра i из вектора типов параметров $\Pi = \{n_i\}$.

C – вектор четко заданной последовательности описаний.

$C = \{c_i\}$, где c_i – значение параметра i из вектора типов описаний $K = \{k_i\}$.

Пример. Опишем таблицу кодов валют *ccycodes*, у которой есть три колонки *ccu* (символьный код валюты), *ccn* (числовой код валюты), *ccu_name* (наименование валюты).

Occycodes = <*ccycodes*, таблица, *Occycodes*, *ccu*, *Occycodes.ccn*, *Occycodes.ccu_name*, *Pccycodes*, *Cccycodes*>

Occycodes.ccu = <*ccu*, колонка, *Pccu*, *Cccu*>

Occycodes.ccn = <*ccn*, колонка, *Pccn*, *Cccn*>

Occycodes.ccu_name = <*ccu_name*, колонка, *Pccu_name*, *Cccu_name*>

Параметры объекта. Количество элементов вектора P может изменяться в зависимости от прикладной области, текущей задачи, требований к системе, среды окружения. Но при этом множество расширяется без больших затрат, поскольку все данные, которые хранятся в P , четко определимы. Данные выбираются из БД или среды окружения.

Все элементы множества P определяются автоматически, т. е. для загрузки объекта в МС не нужно дополнительно в исходной системе дописывать какие-то параметры.

Для одного и того же типа объекта набор элементов векторов Π и P будет одинаков.

На основе P строятся четко заданные классификаторы. Условие на попадание объектов в классификатор задается в виде обычного фильтра, в котором указывается параметр, операнд (жестко ограниченное количество) и значение.

По мере развития МС количество описанных параметров будет увеличиваться, а необходимость в расширении этого множества сокращаться. Таким образом, получаем, что для каждого проекта $K_{i+1} \supseteq K_i$, где i – порядковый номер проекта.

Если в каком-либо из проектов не нужно обрабатывать все описанные в МС параметры объектов, то пользователь отключает в настройке наполнения МС ненужные параметры. При этом структура МС остается неизменной, поля для значений отключенного параметра остаются. Затраты на пополнение МС сокращаются, но пользователю предоставляется возможность в любой момент воспользоваться любыми (даже отключенными пока) параметрами МС. Если в какой-то момент они ему понадобятся, нужный параметр включается при настройке.

Задавая вектор P для таблицы и колонок таблицы, возможно:

однозначно идентифицировать каждую таблицу и колонку в ней;

построить на любой базе таблицу аналогичной структуры;

строить запросы к исходной таблице, основываясь только на ее описании.

Описание объекта. Значения компонент вектора C – это всевозможные описания объекта O на языке пользователя. Таким образом, C – это основа МС, именно он служит для перевода пользователю описания системы с языка БД на язык пользователя. Количество элементов C условно постоянно. Изначально следует стремиться к тому, чтобы элементы C могли полностью описать объект O . Количество элементов C зависит от многих факторов: предметная область, полнота описания уже существующей БД, требования к системе и др. Но при этом, по мере развития МС и появления новых элементов C , которые ранее не использовались в предыдущих проектах, пользователю предоставляется возможность настраивать их при необходимости. В процессе эволюции МС появится возможность развивать исходные системы в плане расширения описаний их объектов. Таким образом, так же как и для множества Π , получаем, что для каждого проекта $K_{i+1} \supseteq K_i$, где i – порядковый номер проекта.

В отличие от алгоритма добавления нового параметра в вектор P , где не требуется никаких доработок исходной системы, при добавлении нового параметра в C , они могут потребоваться.

На основе вектора C строятся пользовательские классификаторы. Количество их четко не определено. Критерии отбора объектов под определенный классификатор пользователь вводит сам, руководствуясь набором правил задания классификатора. По этим правилам с использованием значений из C выбираются необходимые объекты. Язык задания классификаторов объектов можно сравнить с заданием расширенного поиска в Internet: указываются ключевые слова, конструкции, маски на строки.

Описание классификаторов. Определим классификатор системы следующим образом:

$$\Omega = \{\omega\} \rightarrow O_\omega \subseteq O,$$

где ω – множество ограничений на множестве всех объектов O , позволяющее однозначно идентифицировать подмножество O_ω .

Поскольку любой объект множества O может быть записан в виде $O = \langle n, t, \{O\}, P, C \rangle$, то описание ограничений должно состоять из пяти подмножеств $\omega = \langle \omega_n, \omega_t, \{\omega\}, \omega_P, \omega_C \rangle$.

Из этого описания может быть исключено первое ограничение на наименование объекта. Оно может быть перенесено в ω_P , поскольку наименование объекта является подмножеством P .

Теперь рассмотрим более подробно рекурсивное описание объектов, а, соответственно, и ограничений. Для объектов рекурсия получается из условия, что объект описывается через другие объекты МС, при этом важно, что эти объекты всегда другого типа. Для задания ограничения на объект достаточно задать тип объекта, на который накладывается ограничение и само ограничение. В системе все описания объектов хранятся в двух множествах: P и C . Поэтому описание ω сводится к следующему $\omega = \{\omega_P, \omega_P, \omega_C\}$.

В итоге получаем общую формулу описания классификатора $\Omega = \{\omega_P, \omega_P, \omega_C\}$.

Построение базы метаданных. Первым шагом построения МС является определение тех целей и задач, для которых будет строиться данная МС. Результатом формирования задач МС должен стать набор характеристик объектов, который будет храниться в репозитории. Предложенная модель говорит только о том, как представляются объекты системы, но не о том, какие именно данные мы будем хранить. Есть жесткие ограничения модели на хранимые данные. Так, описания объекта, содержащиеся в векторе P , должны быть предметнонезависимыми. То есть



Рис. 2. Связи объектов

там содержатся описания самого объекта как физического файла на диске и объекта БД, но нет привязки непосредственно к предметной области. Таким образом, свойства P должны быть заполнены всегда, причем заполняться они должны в автоматическом режиме. Свойства, описываемые через C , наоборот, полностью зависимы от предметной области. Здесь основная нагрузка ложится на пользователя. Именно он должен сформулировать, откуда получать то или иное значение. Если же данных пока нет, то пользователю придется их вносить вручную.

Поскольку одна из важных особенностей разрабатываемой МС – ее расширяемость, то первые реализации МС выявили набор атрибутов, которые в большинстве своем покрывают основные необходимые свойства элементов системы. Приведем некоторые из них.

Элементы $\Pi_{\text{табл}}$: дата создания; дата последнего изменения; пользователь, создавший объект; пользователь, изменивший объект.

Элементы $\Pi_{\text{кол}}$: тип параметра объекта; длина параметра объекта; длина дробной части; возврат значения из процедуры; значение по умолчанию.

Также приведем рекомендуемые элементы K : пользовательское имя объекта; краткое описание объекта; полное автоматизированное описание объекта; пользовательский комментарий к объекту.

Поскольку МС разрабатывается на основе

данных реляционных СУБД и предполагается, что в качестве ядра для МС будет выступать тоже реляционная СУБД, то проектирование БД МС производится с использованием аппарата реляционной алгебры.

Рассмотрим описание объекта МС: $O = \langle n, t, \{O\}, P, C \rangle$. Как уже отмечалось выше, вектор Π является функцией типа t . Выделим следующие классы:

1. процедуры, функции, таблицы и представления;
2. параметры процедур и столбцы таблиц;
3. типы данных.

В результате анализа свойств объектов, входящих в каждый из классов, получается следующий вид связи объектов в БД (рис. 2).

Именно для такой архитектуры реализуется база данных МС.

Загрузка метаданных

Для обеспечения универсальности механизма загрузки предлагается специализированный формат, который является промежуточным звеном между МС и исходными данными (рис. 3).

При таком подходе можно разделить логику выгрузки данных из внешних источников и логику загрузки данных в МС. Несмотря на то, что количество шагов загрузки данных при этом увеличивается, логика упрощается. Так, требуется написать только один загрузчик данных в МС F_1 .

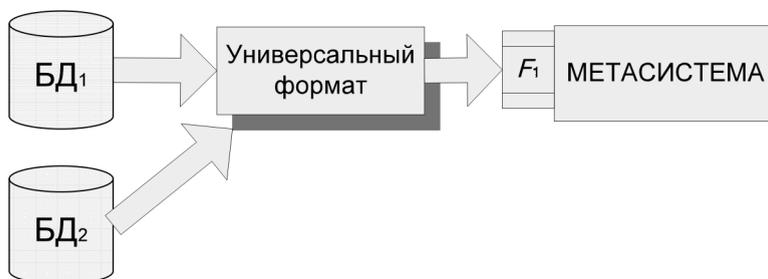


Рис. 3. Загрузка метаданных

Поскольку он будет получать данные в универсальном формате, его можно использовать при загрузке данных из любой системы. Более того, для загрузчика F_1 нет различия в СУБД, на которой построена система-источник. Он «умеет» работать только с данными, представленными в универсальном формате.

Для построения подсистемы загрузки данных в МС, не зависящую от СУБД источника, на основе анализа предметной области и особенностей загружаемых МД предлагается следующий механизм работы.

Для реализации требований данные извлекаются не непосредственно из БД, а загружаются из внешних файлов на диске. Эти файлы – скрипты создания объектов БД. Получить такие файлы можно с помощью служб автоматического скриптования объектов в любой промышленной СУБД. Таким образом, обеспечиваются минимальные затраты на получение данных в универсальном формате.

Данные из внешних файлов загружаются в МС. При этом сама МС реализуется на некоторой конкретной СУБД. Для того чтобы минимизировать привязку к логике конкретной СУБД загрузка разбирается на два этапа:

1) синтаксический разбор внешних файлов и запись необходимых данных в интерфейсные таблицы;

2) загрузка данных из интерфейсных таблиц в таблицы МС.

При таком подходе реализация первого пункта не привязана ни к СУБД источника, ни к СУБД приемника. Единственное условие – сам синтаксический анализатор должен уметь «читать» скрипты конкретного языка SQL. Но в данном случае, поскольку представляет интерес не внутренняя логика скриптов, а только их описание, реализуется универсальный анализатор на основе синтаксиса стандарта SQL ANSI. Второй этап реализации привязан только к структуре МС и не взаимодействует с источником данных.

Дальнейшее использование

Отметим основные моменты, которые могут упростить построение и дальнейшее использование МС. Их можно назвать организационными мероприятиями, поскольку эти требования долж-

ны быть приняты в рамках всей организации, использующей МС.

Так, при подготовке исходной информации для загрузки необходимо максимально полно описать значения вектора C для выбранных типов описаний вектора K . Алгоритм работы с МС в таком случае следующий:

описание значений C для всех объектов системы;

загрузка данных в МС;

первичная классификация данных;

дописание объектов, если это необходимо в самой МС.

При этом, если в организации принят стандарт на оформление текстов с обязательным требованием писать комментарии, то необходимость в дополнительном описании просто отпадет.

В рамках этой статьи рекомендуется максимально полно использовать механизм пользовательских типов, встроенный в стандартные поставки большинства промышленных СУБД. С этой целью в исходной системе нужно выделить основные часто используемые домены. Для каждого такого домена следует завести свой пользовательский тип. Выделение доменов может производиться в рамках самой МС. После первоначальной загрузки данных начинается выделение и классификация основных типов, которые в дальнейшем переносятся в сами объекты БД.

Практическое применение

В данной статье мы не будем подробно останавливаться на особенностях использования МС для конкретных прикладных задач. Отметим, что представленные решения были реализованы в рамках МС на основе СУБД MS SQL Server 2005. Загрузка объектов в МС выполнена с применением механизмов **vbs-скриптов и хранимых процедур**. Интерфейс системы выполнен на базе ядра учетной системы СКАУТ фирмы «Деловые консультации, Санкт-Петербург».

Построенная МС была включена в коммерческие программные продукты:

«СКАУТ-Навигатор» в качестве средства настройки и построения аналитической отчетности по выполняемым работам уборочной техникой в Санкт-Петербурге;

«СКАУТ-РБД» в качестве средства построения многомерных OLAP-отчетов для анализа деятельности торгового предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бутенко, И.В.** Реализация механизма загрузки метаданных в Microsoft Analysis Services [Текст]/И.В. Бутенко, В.Э. Ковалевский//Технология Microsoft в теории и практике программирования.–СПб., 2010.
2. **Бутенко, И.В.** Метасистема, как основа доступа в неоднородной распределенной базе данных [Текст]/И.В. Бутенко, А.А. Зотов, С.М. Устинов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2007.
3. **Шовкун, А.** Как повысить прозрачность аналитических систем и снизить их ТСО [Текст]/А. Шовкун//Директор ИС.–2005.–№ 05.
4. **Inmon, W.H.** Metadata in the Data Warehouse [Текст]/W.H. Inmon.–White Paper, 2000.
5. **Барсегян, А.А.** Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP [Текст]/А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко [и др.].–СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
6. **Черняк, Л.** От данных к информации [Текст]/Л. Черняк//Открытые системы.–2006.–№ 02.
7. Спецификация «Общая метамодель Хранилища данных» [Электронный ресурс] <http://www.getinfo.ru/article198.html>



Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

УДК: 004, 004.9

Ю.Я. Болдырев

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СОВРЕМЕННОЕ ВОПЛОЩЕНИЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА В НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

18 июня 2009 г. в своем вступительном слове на первом заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России Президент РФ Д.А. Медведев обозначил пять приоритетных направлений развития экономики страны. Приведем их полный список, поскольку далее мы будем к нему обращаться. Итак, это следующие направления:

энергоэффективность и энергосбережение, в т. ч. вопросы разработки новых видов топлива; ядерные технологии;

космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая, конечно, и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры;

медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства;

стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения.

Если первые четыре направления, названные Президентом, вполне понятны не только специалистам, но и большинству граждан России, то последнее направление, связанное с суперкомпьютерными технологиями, требует определенных пояснений. Более того, существо таких технологий, их значимость настолько велики для ускоренного экономического развития России, становления в ней современной высокотехнологичной экономики, что это направление требует отдельного рассмотрения. Особенно важно такое рассмотрение с позиций образовательного и научного процессов в Политехническом университете, направления деятельности которого чрезвычайно широки.

Прежде всего, укажем, что мы вкладываем в понятие «суперкомпьютерные технологии», т. е. определим это понятие. Итак, далее под суперкомпьютерными технологиями нами понимаются следующие составляющие:

1. Производство суперЭВМ.

2. Разработка системного и прикладного программного обеспечения для суперЭВМ.

3. Совокупность знаний и технологий, необходимых для предметного использования суперЭВМ (включая образовательную деятельность).

Последняя позиция, как видим, крайне широка, что обусловлено все возрастающим внедрением суперкомпьютеров во все стороны человеческой деятельности.

Суперкомпьютерные технологии часто отождествляют с технологиями высокопроизводительных вычислений (High Performance Computing – высокопроизводительные вычисления). При этом необходимо отметить, что само понятие «суперЭВМ» (суперкомпьютер) является, если так можно выразиться, временно верным... Почему?! Приведем такой пример: одна из лучших советских машин конца 70-х – начала 80-х гг., машина БЭСМ–6 имела производительность около 1 млн операций в секунду, и это было выдающейся скоростью работы, в сравнении с массовыми машинами того времени М-220, БЭСМ–4 и другими, которые выполняли не более 10–20 тыс. операций в секунду. Но в наши дни персональный компьютер имеет производительность в сотни раз выше, чем БЭСМ–6, хотя не относится к суперЭВМ! Таким образом, мы приходим к тому, чтобы к суперкомпьютерам отнести такие классы вычислительных систем, которые на данном отрезке

времени имеют производительность на несколько порядков больше чем массово распространенные компьютеры. Например, самый мощный на момент написания этих строк суперкомпьютер JAGUAR-Cray XT5, занимающий первую позицию в мировом рейтинге (см. табл.) имеет 224162 ядер – процессоров (данная суперЭВМ построена на так называемых «многоядерных процессорах», где каждый из процессоров AMD Opteron Six Core 2.6 GHz имеет по 6 ядер). Таким образом, с некоторой долей условности, можно сказать, что суперЭВМ JAGUAR-Cray XT5 в 224162 раз производительнее, чем ординарный персональный компьютер! Вместе с тем следует отметить, что и среди суперкомпьютеров необходима своя градация, поскольку, например, один из наиболее мощных кластеров СПбГПУ – 256-ядерная система производства компании «Т-Платформы» (2006 г.) практически несопоставим по мощности с упомянутой системой JAGUAR-Cray XT5.

Сегодня производительность компьютеров измеряют в так называемых «Гигафлопах в секунду» (1 Gflop/s = 10^9 операций с плавающей точкой в с). При этом 1000 Гфлоп/с, т. е. 10^{12} операций с плавающей точкой в с называют «1 Терафлопом в секунду» (1 Tflop/s), а 1000 Тфлоп/с называют «1 Петафлопом в секунду» (1 Pflop/s). То есть, 1 Pflop/s= 10^{15} операций с плавающей точкой в с. В текущем мировом рейтинге 500 наиболее мощных суперкомпьютеров TOP – 500 (ноябрь 2009 г.), приведенном в таблице, на первой позиции находится упомянутая машина JAGUAR-Cray XT5 с производительностью выше 2 Пфлоп/с.

Как видим, самая мощная российская система –

суперкомпьютер «Ломоносов», работающий в МГУ имени М.В.Ломоносова, находится на 12-й позиции в мировом рейтинге.

Теперь, отметив фантастические скорости работы современных суперкомпьютеров, поставим такой, как нам видится, важнейший вопрос: что является фундаментальной основой их применения в научных исследованиях, инженерных расчетах и иных видах деятельности. Какой научный инструментарий исследователи, инженеры и, в конечном итоге, программисты, используют в компьютерных программах при решении своих задач? Любопытно отметить, что многих этот вопрос ставит в некоторый тупик. При этом лучшие ответы (например, «вычислительные методы» или «вычислительная математика») не вполне точно отражают суть проблемы. Точный ответ следующий – инструментарий математического моделирования.

Здесь уместно сказать о том, что математическое моделирование в течение XX в. превратилось в тотальный инструментарий, которым владеет человечество. И это весьма важно с точки зрения существа связи суперкомпьютерных технологий и того, что мы называем «Политехническим подходом» в научно-образовательной деятельности нашего вуза. Действительно, математическое моделирование применимо и используется практически везде в инженерной деятельности, а суперкомпьютерные технологии служат объединяющим звеном ее разных направлений.

Вообще, современное понимание существа математического моделирования начало формироваться в конце XIX–начале XX вв. В его становлении выдающуюся роль сыграли труды

Первые позиции мирового рейтинга 500 наиболее мощных суперкомпьютеров (TOP – 500)

	Владелец	Тип компьютера/ производительность/ год выпуска	Число ядер	Пиковая производительность, Тфлоп/с
1	Oak Ridge National laboratory, USA	JAGUAR-Cray XT5-HE Opteron-Six-core/2009	224162	2331.00
2	DOE/NNSA/LANL, USA	RoadRunner-Blade Center/2009	122400	1375.78
3	National Institute for Computational Sciences/University of Tennessee, USA	Kraken -Cray XT5-HE Opteron-Six-core/2009	98928	1028.85
...
12	Moscow State University, Research Computing Center, Russia	Lomonosov- T-Platforms/2009	35360	414.42

Р. Фреше и Д. Гильберта, которые ввели новое понимание близости в математике (соответственно, метрическое и гильбертово пространства [1]). В итоге были созданы новые подходы в вычислительной математике и заложены теоретические основы современного математического моделирования. В дальнейшем его формировании решающую роль сыграли новые идеи в формулировке задач математической физики в виде интегральных тождеств [2], а также восходящий к Р. Куранту метод конечных элементов, послуживший основой разработки вариационных и проекционных разностных методов решения задач математической физики [3]. Огромную роль в формировании современной концепции математического моделирования сыграла российская наука в лице А.А. Самарского [4], О.М. Белоцерковского и других выдающихся ученых.

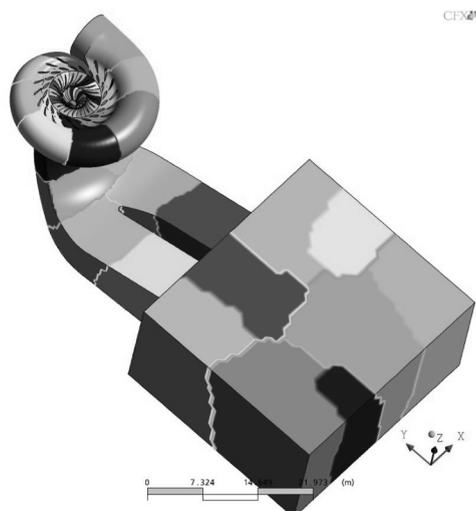
Важно отметить, что процесс становления и развития математического моделирования, оказал по своему существу не меньшее, а скорее даже большее влияние на достижения цивилизации, чем революция в физике, восходящая к теории А. Эйнштейна и работам великих физиков М. Планка, Э. Резерфорда, Н. Бора и других, работавших на рубеже XIX–XX вв. Действительно, замена физического эксперимента на эксперимент вычислительный (которым по своей сути и является математическое моделирование) привел к революционной смене методологии как в изучении природы, так и во все более разумном формировании среды жизнедеятельности человека. Появление вычислительных машин во второй половине XX в. привело к качественно новому этапу научно-технической революции и окончательно сделало математическое моделирование важнейшим инструментарием ученых и инженеров.

Также немаловажно отметить следующее: сегодня часто говорят, что наше время характеризуется внедрением во все сферы жизни общества информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Это действительно так. Главным образом, под этим подразумевается развитие глобальной компьютерной сети – Интернета. Но это лишь одна из важных составляющих внедрения ИКТ и, вместе с тем, одна из ее простых, внешних сторон. Несравнимо более значительные, и не видимые большинством людей масштабы, представляют собой научно-исследовательские, производственные и другие аспекты развития и внедрения ИКТ, составляющие фундаментальную основу совре-

менной экономики. По своему существу, именно компьютерные технологии в самых разнообразных формах, опирающиеся на математическое моделирование, являются важнейшим направлением развития всей системы технологий в развитых странах мира.

Теперь мы можем пояснить, почему суперкомпьютерные технологии, в некотором смысле, стоят отдельно от всего множества компьютерных технологий. Фундаментальное отличие суперкомпьютерных технологий, выделяющее их среди всего богатства компьютерных технологий, – то обстоятельство, что в основе как создания суперкомпьютеров, так и разработки всего спектра программного обеспечения к ним лежат так называемые «параллельные вычислительные технологии» [5, 6], являющиеся весьма тонкой областью современной математики. Именно параллельные вычислительные технологии делают суперкомпьютерные технологии мощным, но одновременно и значительно более трудным в освоении инструментарием. Трудным, поскольку требует от пользователя глубоких знаний как в области его предметной деятельности (которая сегодня все более и более тяготеет к междисциплинарной, о чем мы еще скажем далее), так и в части применения суперЭВМ. Существо мощности суперкомпьютерных технологий заключается в том, что они позволяют решать задачи качественно более высоких классов, которые недоступны ни персональным компьютерам, ни мощным рабочим станциям. Что же касается основы параллельных вычислительных технологий, то они, говоря несколько упрощенно, позволяют разделить решаемую задачу на ряд подзадач, которые могут решаться на суперкомпьютере одновременно (параллельно на множестве процессоров). На рисунке приведено характерное разбиение всей проточной части гидротурбины на 16 подобластей [7], каждая из которых обрабатывается «своим» процессором.

Итак, теперь мы можем ответить на сформулированное в начале утверждение о том, почему суперкомпьютерные технологии требуют отдельных подходов от других компьютерных технологий. Это отличие, главным образом, состоит именно в применении технологий параллельных вычислений – главным факторе высокой эффективности работы суперЭВМ при решении на них разных классов задач. Эта эффективность является основой, обеспечивающей решение таких



Характерное разбиение расчетной области при расчете проточной части гидротурбины

классов задач, к самой физико-математической и инженерной постановке которых не могли подступиться инженеры и исследователи предыдущих поколений.

Теперь, опираясь на имеющийся у нас опыт, попытаемся показать, что проблематика суперкомпьютерных технологий, их внедрение и развитие являются критически важными для экономики России, в полном соответствии с оценками, данными Президентом на упомянутом заседании, а также на заседании Совета безопасности РФ 28 июля 2009 г. Приведем характерную цитату из выступления Д.А. Медведева: «Огромная часть предпринимателей, не говоря уже о чиновниках, вообще не знают, что такое суперкомпьютеры. Для них это экзотика вроде станков, которые в 20-е годы создавались, чтобы догнать и перегнать Америку». К большому сожалению, эта оценка справедлива и относится к значительной части инженерного и научного сообщества. Один характерный пример: в таком крупном научно-техническом центре страны, как Санкт-Петербург, суперкомпьютерные системы имеются в считанном числе организаций: СПбГПУ, СПбГУ, ФТИ имени А.Ф. Иоффе и в СКБ завода ЛМЗ, принадлежащего корпорации «Силовые машины». Ряд сравнительно небольших систем используется еще в нескольких организациях.

Теперь уместно обратиться к тем направлениям развития страны, о которых говорил Президент, и которые приведены в начале статьи.

Возьмем в качестве примера первое из направлений, названных Президентом, и которое, условно, назовем «энергоэффективность и энергосбере-

жение». Сюда, естественно, отнести технологии, относящиеся ко всей «цепочке» от добычи энергоресурсов до их потребления. Это направление включает в себя процессы получения и передачи энергии, ее эффективное использование, вплоть до анализа мест и причин утечек тепла из промышленных и жилых зданий и т. д. Рассматривая весь этот спектр технологий нетрудно заметить, что все они (от технологий добычи, до технологий сжигания топлива в различных типах энергомашин и двигателей, как и в котлах ТЭЦ) носят, с точки зрения физики процессов, глубоко взаимосвязанный – междисциплинарный характер.

Возьмем, к примеру, энергомашиностроение и обратимся к такой его отрасли как разработка и производство гидротурбин. Мощные гидротурбины современных гидроэлектростанций – это высокотехнологичные изделия. Только несколько стран поставляют гидромашину на мировой рынок, где идет жесткая конкуренция и ведется борьба за проценты и доли процентов КПД гидромашин и иные характеристики. Что касается КПД, то он решающим образом определяется характером геометрии проточной части гидротурбины (рабочее колесо, направляющий аппарат и т. д.). Построение наилучшей, с точки зрения повышения КПД, геометрии принципиально невозможно никаким физическим экспериментом. Действительно, требуемое здесь оптимальное профилирование всех элементов проточной части, с точки зрения математики, есть не что иное, как связанная пространственная задача Лагранжа вариационного исчисления [8], где в качестве связей выступают дифференциальные уравнения

механики вязкой жидкости. Не будем при этом забывать, что течение во всей проточной части носит турбулентный характер.

Итак, на первый взгляд, описание течения в гидротурбинах – чистая проблема вычислительной гидродинамики. Однако более глубокий анализ показывает, что при тех нагрузках, которые испытывает рабочее колесо турбины, проблемой является износ его поверхности под воздействием кавитации. Таким образом, упомянутые уравнения связей в названной выше вариационной задаче становятся еще более сложными и не сводятся только к уравнениям турбулентного течения вязкой жидкости. Эти связи носят ярко выраженный междисциплинарный характер. Действительно, кроме уравнений турбулентного движения жидкости мы должны описать и процессы кавитации на поверхности металла, включая проблемы, связанные с физикой металлов. Но и это еще не все! Нельзя забывать про процессы упруго-гидродинамического взаимодействия рабочего колеса с потоком жидкости, которые при имеющемся уровне давлений (многие десятки атмосфер) могут оказаться существенными.

Таким образом, полномасштабная, корректная физико-математическая постановка задачи описания течения в проточном тракте гидротурбины, представляет собой совокупность связанных начально краевых задач математической физики. При этом рассматриваемая задача решается в весьма сложной области, представленной на рис. 1, и для ее удовлетворительного описания необходимо разбиение области решения задачи на многие миллионы ячеек (так называемых «конечных объемов»). В наших совместных работах с ЛМЗ в 2006–2007 гг. [6] вычисления во всей проточной части проводились на 5,6 млн конечных объемов. Немаловажно иметь в виду, что при расчетах в каждом таком конечном объеме мы вычисляем три компоненты вектора скорости и давление, плюс, как минимум, две составляющие энергии турбулентных пульсаций. При решении междисциплинарных задач дополнительно необходимо знать плотность и температуру воды. Таким образом, число неизвестных исчисляется уже десятками миллионов.

Но и такими масштабами задачи не исчерпываются имеющиеся проблемы. Они усугубляются ее нестационарностью. Действительно, т. к. рабочее колесо вращается по отношению к неподвижному направляющему аппарату, то для характер-

ного варианта нестационарного расчета требуется примерно 40 с «виртуального времени», при расчете на одном условном периоде – сектор рабочего колеса – сектор направляющего аппарата. Если же мы хотим провести полный нестационарный расчет на всех указанных периодах, то расчет проточной части турбины, в целом, в таком случае потребует около 38 млн конечных объемов, а соответствующее число неизвестных будет исчисляться сотнями миллионов.

Теперь приведем данные по характерным масштабам потребного времени для проведения расчетов. В нестационарном случае (в указанном только что смысле для 40 с виртуального времени) при расчете всей проточной части, в рамках только одной гидродинамической задачи при 5,6 млн конечных объемов, потребовалось три месяца с использованием 24 ядер-процессоров суперЭВМ! Заметим, что провести расчеты на сетках с 38 млн конечных объемов на имеющихся у нас суперкомпьютерах пока представляется затруднительным – это дело ближайшего будущего.

Еще одним характерным примером использования суперкомпьютерных технологий является математическое моделирование процессов горения. С точки зрения физических процессов, протекающих при горении, они являются типичным примером междисциплинарных задач. Действительно, например, при горении газа в единый процесс «завязаны»: аэродинамика, тепло и массообмен, излучение и физико-химические процессы. Таким образом, физико-математическая постановка такой задачи включает в себя связанную совокупность нескольких начально-краевых задач математической физики. Решение такого класса задач требует больших вычислительных ресурсов, и даже на сравнительно небольших размерностях сеток может занимать очень много времени на значительном числе процессоров, т. е. при относительно «хорошем» распараллеливании вычислительной задачи.

Если мы разрабатываем, какое-либо устройство или систему, где используются процессы горения в самых разных формах (от бытовых или промышленных газовых горелок, до взрывных процессов в различных двигателях внутреннего сгорания), то нам необходимо озаботиться вопросами эффективности горения в данной системе. Характеристиками-критериями такой эффективности могут быть наивысшая теплоотдача, экологически чистое горение и т. д. [9]. Таким образом,

мы опять приходим к необходимости решения инженерной задачи оптимизации с большим числом дифференциальных уравнений – связей. Заметим, что такой класс задач прямо относится к тому, который мы отнесли к направлению «энергoeffективность и энергосбережение».

Приведенные примеры показывают, что в части приложения к инженерному анализу и проектированию, программная составляющая суперкомпьютерных технологий, отнесенная нами ко второму их блоку, есть характерная совокупность технологий компьютерного инжиниринга (CAE – Computed Aided Engineering). В целом же, вся программная составляющая суперкомпьютерных технологий, как и все программное обеспечение для компьютеров, делится на две традиционные части: системную и прикладную.

Вообще, разработка программного обеспечения (ПО) для многопроцессорных вычислительных систем – важная область высоких технологий. Здесь она приобретает особую важность, поскольку от эффективности работы ПО зависит эффективность эксплуатации дорогостоящих суперкомпьютерных систем. Причем, именно ПО, в первую очередь, позволяет выделить в указанном выше смысле суперкомпьютерные технологии. Если вычислительная мощность определяется многопроцессорностью, то суперкомпьютерные технологии мы относим к наиболее тонким инструментам по той причине, что практически все ПО для суперЭВМ строится на упомянутых выше параллельных вычислительных технологиях.

Здесь уместно отметить, что Президент не напрасно отнес разработку программного обеспечения к приоритетному направлению развития экономики. Для России проблема разработки ПО превратилась в серьезную проблему национальной безопасности. Действительно, несмотря на непрерывающиеся разговоры о «силе» российских программистов и их разработок, и, несмотря на многочисленные победы на мировых турнирах по программированию, от всего этого мало толку для развития индустрии программного обеспечения в стране. В России как не было, так, практически, до сего дня, и нет того российского ПО, которое мы можем отнести к наукоемкому программному обеспечению, т. е. ориентированному на решение задач инженерного и естественнонаучного анализа. А ведь базой для создания такого ПО служит математическое моделирование со всеми его составляющими как фундаменталь-

ными, так и программно-технологическими, где Россия традиционно была сильна. Единичный пример маленькой компании «Тесис», разрабатывающей аэрогидродинамический комплекс «Flow Vision», скорее исключение, чем правило.

Нельзя не отметить и тот прискорбный факт, что в России нет собственных разработок системного ПО для массового использования на суперЭВМ.

Здесь уместно остановиться на той роли, которую должно играть современное прикладное ПО в виде наукоемких программных комплексов в научно-образовательной деятельности высшей школы. Уже более десяти лет мы, в Политехническом университете, ведем постоянную работу по внедрению и развитию таких комплексов в учебной и научной работе вуза. Почему мы придаем большое значение этому направлению деятельности? Ответ и прост, и, по-своему, труден, одновременно. Такие программные комплексы позволяют решить задачу «целиком»: от ее постановки до получения результата в требуемой форме в рамках одной программной среды. При этом исследователь или инженер могут не беспокоиться о деталях процесса математического моделирования – большинство шагов-процедур этого процесса «зашиито» в обозначенной программной среде. Таким образом, решение задачи представляет собой полномасштабную реализацию инструментария математического моделирования на компьютере (суперкомпьютере). Но владение такими современными инструментами, как показывает наш опыт, под силу выпускникам только тех вузов, которые ориентируют их на исследовательский характер будущей деятельности. При этом важно понять, что программные комплексы уровня, например, гидроаэродинамического комплекса **Ansys Fluent**, представляют собой уникальный инструмент для использования в учебном процессе, поскольку позволяют проводить лабораторные практикумы, курсовые работы, не говоря уже о том, что дают богатый интерактивный материал для лекционной работы. Вообще, основываясь на сказанном, представляется, что программные комплексы на основе компьютеров (суперкомпьютеров), в той или иной форме, в ближайшее время станут важным элементом образовательного процесса в вузах.

Приведенные нами последние соображения дают основание утверждать, что суперкомпьютерные технологии, особенно в части технологий

компьютерного инжиниринга, есть объединяющая основа того подхода, который мы в нашем вузе называем «политехническим». Действительно, для Политехнического института-университета всегда была свойственна интеграция научных направлений, развиваемых на разных факультетах. При этом такая интеграция всегда основывалась на фундаментальных основах инженерных наук. Возьмем, к примеру, гидроаэродинамику как отрасль, представляющую собой одну из базовых основ инженерного знания. Сами ее фундаментальные основы, включая вычислительные технологии, развиваются, главным образом, на физикомеханическом факультете. Но, в то же время, на инженерно-строительном, энерго-машиностроительном, механико-машиностроительном и ряде других факультетов, прикладные аспекты гидроаэродинамики применяются и развиваются очень широко. На этих факультетах методы современной вычислительной гидроаэродинамики являются одними из ключевых, естественным образом переплетаясь с прикладными основами механики твердого и деформируемого тела, физико-химическими и иными основами инженерного знания. Причем это относится как к учебному процессу, так и к созданию передовых методов разработки новых машин и систем и собственно технологий. Таким образом, мы вновь приходим к необходимости применения междисциплинарных, и, тем самым, вычислительно ресурсоемких САЕ – технологий, где, как мы видели, ключевым инструментом являются суперкомпьютеры.

В заключение, естественно остановиться на состоянии дел с работами в области суперкомпьютерных технологий в Политехническом университете. Основные «пользователи-потребители» таких технологий в вузе – кафедры физикомеханического факультета. В первую очередь, это группа кафедр, объединившихся в межкафедральную лабораторию прикладной математики и механики (кафедры прикладная математика, компьютерное моделирование и эксперимент в теплофизике и математическое и программное обеспечение высокопроизводительных вычислений; профессора Ю.Я. Болдырев, Б.С. Григорьев, А.Ю. Снегирев; доценты С.В. Лупуляк, В.А. Талалов, М.Е. Фролов, Ю.К. Шиндер), а также кафедры аэрогидродинамики и экспериментальной ядерной физики, профессора Я.А. Бердников, Е.М. Смирнов, М.Х. Стрелец. Следует отметить работы по созданию многопроцессорных про-

граммных комплексов для аэрогидродинамических расчетов, ведущиеся в научных группах кафедры аэрогидродинамики.

На базе лаборатории прикладной математики и механики с 2003 г. действует научно-исследовательский Центр коллективного пользования «Наукоемкие компьютерные технологии для нужд науки, образования и промышленности на основе высокопроизводительных вычислительных систем», имеющий статус федерального. В последние годы лаборатория активно взаимодействует с радиофизическим факультетом (профессор И.А. Цикин) в области применения многопроцессорных программных комплексов в учебном процессе.

Следует упомянуть о некоторых достижениях политехников в области суперкомпьютерных технологий и их приложений. Так, наш Политехнический университет был в числе двух вузов (наряду с МГУ имени М.В. Ломоносова), приглашенных представить свои достижения в сфере суперкомпьютерных работ на совещание «Развитие суперЭВМ в России» под председательством спикера Госдумы Б.В. Грызлова в Институте Программных Систем РАН в Переславле-Залесском 11 сентября 2007 г. Также первая масштабная Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии 2008» (28 января – 1 февраля 2008 г.) была проведена в СПбГПУ. Политехнический университет был в числе вузов-организаторов Суперкомпьютерного консорциума университетов России. Что касается научных достижений вуза в данной сфере, то вне сомнения наше передовое положение в области промышленных приложений суперкомпьютерных приложений. На это указывают многочисленные выступления сотрудников вуза на конференциях и совещаниях как в Санкт-Петербурге, так и за его пределами. В рамках взаимодействия с компанией Microsoft в **межкафедральной лаборатории прикладной математики и механики** первыми в России были начаты масштабные работы по сравнительному тестированию многопроцессорных операционных систем Linux и Microsoft Windows 2008 **HPC Server при работе с программными комплексами Fluent и CFX**. В связи с последним, нельзя не отметить и то, что Политехнический университет единственный среди вузов России победил в конкурсе исследовательских проектов Microsoft в 2007 г. (проект лаборатории прикладной математики и механики «Техноло-

гии высокопроизводительных вычислений Майкрософт для обеспечения безопасности и охраны окружающей среды») среди 15 других вузов и научных учреждений со всего мира.

К сегодняшнему дню СПбГПУ имеет, по видимому, один из наиболее масштабных парков многопроцессорных вычислительных систем среди вузов России. В вузе 11 многопроцессорных вычислительных систем общей мощностью свыше 4 Тфлоп/с. Сюда относятся три системы с пиковой производительностью от 1,2 до 1,4 Тфлоп/с, четыре средних системы производительностью от 0,12 до 0,28 Тфлоп/с, и, наконец, пять малых (от 8 до 16-процессорных) с производительностью до 20–25 Гфлоп/с, применяемых, преимущественно, в учебных целях.

Стратегическая цель политики России в области науки и технологий – получение основной

части прироста валового внутреннего продукта за счет новых научных знаний, воплощенных в высоких технологиях и передовой организации производства. Достижение такой цели невозможно без широкого внедрения суперкомпьютерных технологий, развитие которых названо Президентом одним из приоритетных стратегических направлений развития страны. Отставание в развитии таких технологий, не говоря об их утрате, означает для России риск быть отброшенной в разряд технологически отсталых стран. Исходя из этой точки зрения, Политехнический университет, являющийся ведущим Российским техническим вузом, должен ускоренными темпами развивать все стороны суперкомпьютерных технологий, т. е. сами суперкомпьютерные системы и программное обеспечение к ним, а также вести учебную и научную работу в данной сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колмогоров, А.Н.** Элементы теории функций и функционального анализа [Текст]/А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. –М.: Наука, 1989.–624 с.
2. **Ладыженская, О.А.** Краевые задачи математической физики [Текст]/О.А. Ладыженская. –М.: Наука, 1973.–408 с.
3. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем [Текст]/А.А. Самарский.–М.: Наука, 1989.–616 с.
4. **Самарский, А.А.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст]/А.А. Самарский, А.П. Михайлов; 2-е изд., испр.–М.: Физматлит, 2001.–320 с.
5. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления [Текст]/В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. –СПб.: БХВ, 2002.–599 с.
6. **Гергель, В.П.** Лекции по параллельным вычислениям [Текст]/В.П. Гергель, В.А. Фурсов. –Самара: Изд-во СГАУ, 2009.–163 с.
7. **Болдырев, Ю.Я.** Разработка методических вопросов расчета потерь энергии в элементах проточной части гидротурбин с применением вычислительной гидродинамики [Текст]/Ю.Я. Болдырев, Ю.К. Шиндер, С.В. Лупуляк//Отчет о НИР с ОАО «Силловые машины ЛМЗ».–СПбГПУ, 2006.–70 с.
8. **Галлеев, Э.М.** Курс лекций по вариационному исчислению и оптимальному управлению [Текст]/Э.М. Галеев. –М.: МГУ, 1996.
9. **Снегирёв, А.Ю.** Теоретические основы пожарной и взрывобезопасности. Диффузионное горение газов [Текст]/А.Ю. Снегирёв, В.А. Талалов. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.–212 с.

УДК 004.942; 69.07

Ю.Я. Болдырев, Д.В. Климшин, С.В. Романов, А.С. Шанина

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В течение XX в. методы численного анализа приобретали все большую значимость практически во всех отраслях человеческой деятельности. Конечно, в первую очередь, это касалось тех отраслей, которые были связаны с исследова-

тельской и производственной деятельностью. К началу 40-х гг. практически в каждом конструкторском бюро и исследовательском центре были свои машинно-счетные станции, оборудованные механическими и электрическими счетными ма-

щинами. Появление в 50-х гг. ЭВМ привело к колоссальному, понятному и оцененному позднее, прорыву в применении вычислительного эксперимента в инженерной и научной практике. Этот прорыв был, пожалуй, более масштабным по своей значимости, чем, например, появление паровых машин в XVIII в., поскольку затрагивал не отдельные, а буквально все отрасли практической деятельности человека.

Массовое внедрение вычислительных машин и их повсеместное применение выявило необходимость углубленного анализа самих технологий их применения с точки зрения вычислительного эксперимента. Неоспорим вклад отечественных ученых А.А. Самарского, О.М. Белоцерковского и др., создавших в своих трудах концепцию математического моделирования [1].

В данной статье рассмотрим некоторые аспекты применения наиболее передовых подходов (технологий) математического моделирования в строительстве. Начнем с того, что проектирование в строительной индустрии имеет многовековые традиции, которые дали импульсы в развитии механике, теплофизике, материаловедению и многим другим отраслям наук. Математические модели, которые здесь разрабатывались и развивались, послужили основой создания уникальных зданий и сооружений. Вместе с тем, мощная теоретическая и вычислительная поддержка проектирования в строительной сфере стала возможна только в последней трети XX в. на основе создания и развития передовых технологий математического моделирования.

Какую бы сферу инженерного анализа и проектирования в строительстве мы не взяли, – при корректной физико-математической постановке задач мы всегда сталкиваемся с междисциплинарностью в их постановке. Действительно, любая из задач, например, в сфере оснований и фундаментов или в области воздействия ветровых нагрузок на здания и сооружения и других областей в проектировании в строительстве, принципиально, по своему существу, междисциплинарна. Достаточно взять проблемы расчета оснований и фундаментов, в которых в один узел «завязаны» задачи механики твердого и деформируемого тела, гидрогазодинамика тел с полостями, содержащими жидкость и газы, задачи тепломассобмена и т. д.

Современные технологии математического моделирования, опирающиеся на программные комплексы, позволяют решать подобные меж-

дисциплинарные задачи. В таких программных комплексах заложены передовые модели вычислительной механики и физики, позволяющие решать обозначенные классы задач, что придает новое качество самому процессу проектирования, превращая его в полномасштабный инженерный анализ.

Применение математического моделирования при решении задач аэродинамики зданий и сооружений

Ветровые воздействия на высотные здания и сооружения являются, по существу, основными динамическими нагрузками в условиях районов со слабой сейсмичностью (Москва, Санкт-Петербург). Так, например, ветровые нагрузки на сооружение высотой более 75 м могут превосходить проектное пятибалльное сейсмическое воздействие. Немаловажно также и то, что такие нагрузки действуют постоянно, что влияет как на комфортность нахождения в здании людей, так и на напряженно-деформированное состояние конструкции сооружения и грунтового массива под ним.

В большинстве случаев решение задач аэродинамики зданий и сооружений требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку только корректная и масштабная постановка таких задач позволяет наиболее полно учесть все многообразие факторов, влияющих на распределение ветровых потоков вблизи рассматриваемого объекта. В мировой практике известны случаи, когда недостаточный учет ветровой нагрузки на здание (ее пульсационной составляющей) привел не только к серьезным шумовым проблемам в угловых квартирах, но и к вибрациям, существенно превышающим нормативные требования.

Следует отметить, что применение технологий вычислительной гидроаэродинамики на базе суперЭВМ в строительной области является реальными инновациями, придающими новое качество самому процессу проектирования. Вместе с тем, в проектных организациях отсутствует как необходимая суперкомпьютерная база, так и интеллектуальная составляющая в виде специалистов, способных решать подобные проблемы. Широко применяются простейшие подходы к расчету ветрового давления, описанные в СНиП, а также множественные и дорогостоящие эксперименты в аэродинамических трубах по моделированию ветрового потока на большой высоте и измерению его воздействия на здание.

Между тем, возрастающая этажность зданий и усложняющаяся структура фасадов заставляют проектные организации искать более точные и совершенные методы расчета аэродинамических нагрузок. Современные методы математического моделирования с использованием суперкомпьютеров позволяют существенно сократить количество испытаний в аэродинамических трубах и в перспективе отказаться от них. Они позволяют уделить особое внимание тонким вопросам вибрационного и шумового воздействия ветрового потока в зонах углов здания и выступающих элементов. Математическое моделирование также позволяет определять оптимальную форму, размеры и ориентацию здания, исходя из минимизации отрицательного воздействия наружных климатических условий на энергетический баланс здания. При этом может быть проведена комплексная оценка влияния сооружений на окружающую застройку. По опыту возведения зданий за рубежом известно, что высотные объекты могут существенно изменить скорость и направление ветровых потоков у своего основания, существенно ухудшить комфортность пребывания людей (сквозняки, пыль, шум). Особенно сильно влияние на скорость и направление ветров нескольких стоящих вблизи друг от друга высотных зданий.

В рамках применения математического моделирования при решении задач аэродинамики зданий и сооружений исследовались трамплины многофункционального спортивного комплекса «Токсово». Было проведено моделирование об-

текания и экспертные расчеты аэродинамических характеристик конструкций трамплинов HS-140 и HS-106, установленных на плоскости земли. Высоты трамплинов составляют 140 и 106 м, соответственно (рис. 1).

Расчеты проводились на основе численного решения трехмерных уравнений аэродинамики с учетом турбулентности внешнего потока воздуха (использовалась двухпараметрическая модель k - ϵ турбулентности).

В качестве входных данных использовался профиль скорости ветра в приземном слое атмосферы, определяемый в соответствии с нормативными и расчетными ветровыми нагрузками, рассчитанными по СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» для II ветрового района (Санкт-Петербург) и типа местности «А». Рассматривались значения скорости набегающего ветрового потока на высотах от 10 до 100 м от земли, построенных для нормативного значения ветрового давления (60 кгс/м^2 на высоте 100 м при скорости ветра $31,6 \text{ м/с}$). Размеры расчетной области, в которой проводился анализ, составляют $800 \text{ м} \times 800 \text{ м} \times 150$ (высота) м (96 млн м^3). Такой значительный размер расчетной области требуется для получения хорошей, качественной картины ветровых потоков и исключения влияния граничных условий на результат. В расчетную область входят оба трамплина, насыпной склон высотой 40 м, на котором располагаются трамплины, прилегающее здание длиной 60 м, чаша зоны приземления, а также стадион вокруг нее.



Рис. 1. Спортивные трамплины многофункционального комплекса «Токсово»

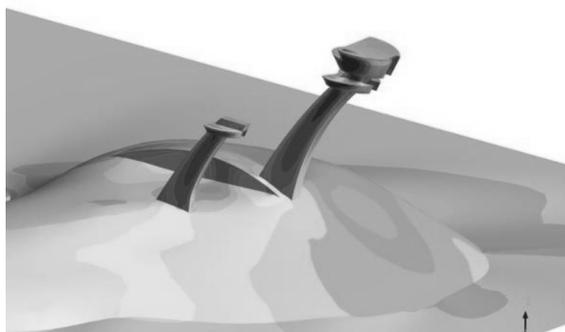


Рис. 2. Результаты моделирования ветровой нагрузки: давление ветра и линии тока

Рассчитанная по итогам моделирования ветровая нагрузка (рис. 2) заложена в статические расчеты для определения прогибов и напряжений конструкции и ее элементов, а также назначения арматуры в железобетонных элементах.

Применение математического моделирования при решении задач механики грунтов

Одна из основных задач при проектировании строительных объектов – оценка несущей способности фундаментной конструкции сооружения (в частности, свай) и оценка осадок фундамента при расчетных нагрузках. Грунтовое основание любого сооружения является не только частью самого сооружения, но и частью природной геологической среды. Из-за этого в системе «основание–фундамент–наземная часть здания» свойства основания обладают наибольшей изменчивостью и с меньшей определенностью поддаются количественному описанию.

В общем случае, наиболее нагруженными элементами конструкции являются непосредственно взаимодействующие с основанием фундаменты и конструкции подземной части здания. Усилия в них определяются с наименьшей достоверностью, чем в конструкциях надземной части.

Современные подходы математического моделирования были использованы при решении задачи взаимного влияния двух трамплинов многофункционального спортивного комплекса «Токсово» и оценке напряженно-деформированного состояния их основания.

Каждый трамплин представляет собой сооружение в виде вертикально-наклонной изогнутой конструкции высотой 140 и 106 м над уровнем земли (рис. 1). Габариты основания трамплина вместе с примыкающим зданием составляют 88 м × 11,8 м. В основании конструкции находит-

ся трехэтажное строение спортивного назначения. На вершине трамплина – округлая башня с помещениями и стартовой площадкой для спортсменов. трехэтажное строение основания представляет собой железобетонное каркасное здание, являющееся нижней опорой для разгонной металлической фермы трамплина.

Оба трамплина рассматриваются как высотные уникальные и технически сложные объекты и, в соответствии с требованиями ТСН 31-332-2006 Санкт-Петербург, относятся к I уровню ответственности и к третьей геотехнической категории сложности в соответствии с требованиями ТСН 50-302-2004 Санкт-Петербург. По данным геологических изысканий в районе предполагаемого строительства трамплинов залегают четырнадцать различных слоев почвы. Возведение каждого трамплина планируется на насыпном холме высотой 40 м для оптимального формирования зоны приземления спортсменов.

Основными проблемами расчета грунтового массива под трамплинами, которые были успешно решены с помощью современных технологий математического моделирования, были:

- взаимное влияние двух трамплинов друг на друга (осадка, крен);
- нелинейное поведение грунтов, в т. ч. с учетом грунтовых вод;
- оценка устойчивости склонов;
- совместная работа трамплинов и грунтового массива;
- учет работы свайного поля под фундаментами трамплинов.

Для корректного учета всех вышеперечисленных факторов в рамках программного комплекса ANSYS была разработана полная пространственная модель грунтового массива (рис. 3).

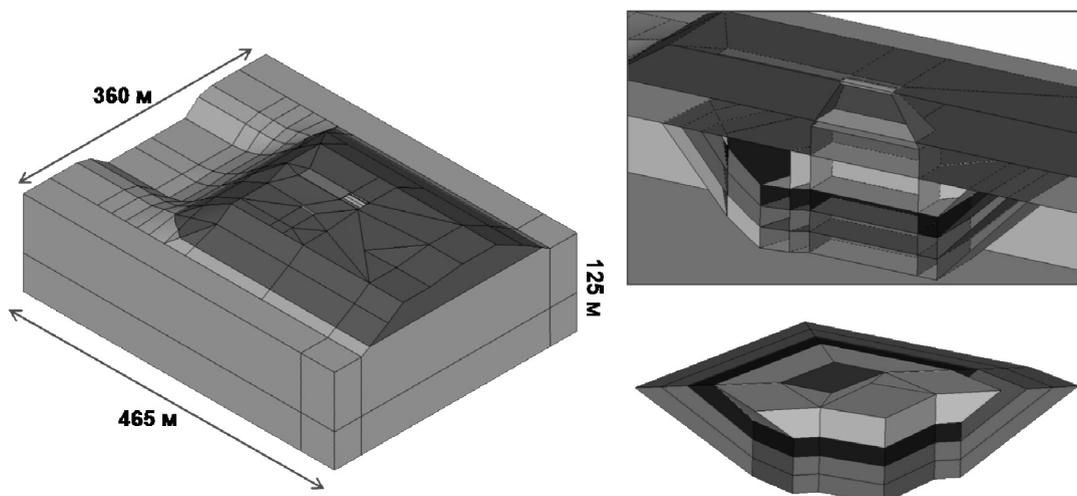


Рис. 3. Полная пространственная модель грунтового массива с многослойной подушкой

При моделировании грунтового массива использовалась математическая модель Друкера–Прагера с ассоциированным законом пластического течения [2, 3]. В результате исследования определено нелинейное пространственное напряженно-деформированное состояние грунтового массива с учетом совместного взаиморасположения зданий и свайных полей. Кроме того, исследовано влияние на осадку трамплинов свойств грунтовой подушки, формируемой на этапе фундаментных работ (рис. 4).

Отдельно был проведен сравнительный ана-

лиз устойчивости грунтового массива при различных условиях и нагрузках, а также на этапах возведения фуникулера, располагающегося на склоне вблизи трамплинов.

Применение математического моделирования при решении задач оптимизации большепролетных металлических конструкций

Несмотря на то, что металлические конструкции используются человечеством уже давно, только сейчас, с развитием вычислительных ме-

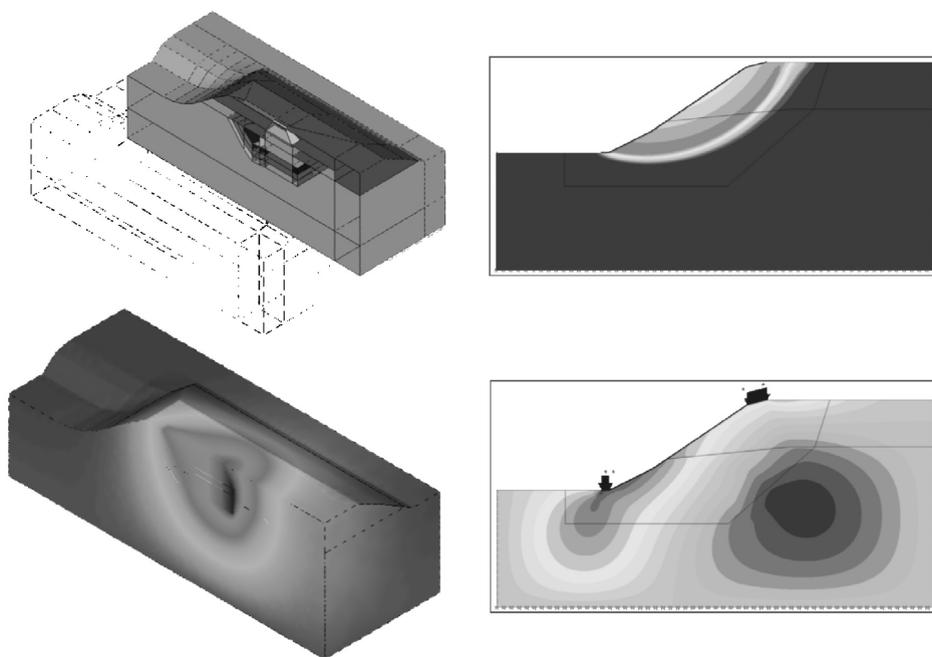


Рис. 4. Результаты анализа осадки трамплинов

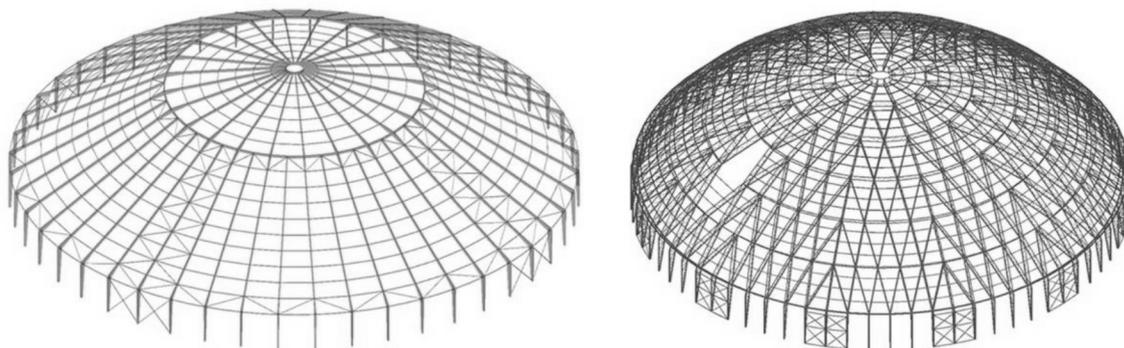


Рис. 5. Изначальная и финальная схемы купола

тодов, появилась возможность наиболее эффективным образом рассчитывать и оптимизировать их технические параметры.

Само понятие металлической конструкции включает в себя не только конструктивную форму, но и технологию изготовления, а также способы монтажа. Данные вопросы детально проработаны и изучены применительно к стандартным конструкциям. При проектировании уникальных и технически сложных конструкций (по классификации нормативных документов) самыми трудными вопросами являются выбор конструктивной схемы, а также методов доставки и монтажа конструкции.

Применение современных технологий математического моделирования позволяет в разумные сроки перебрать несколько вариантов конструктивных схем сооружения, в простран-

ственной постановке смоделировать напряженно-деформированное состояние узлов, а также разработать несколько вариантов монтажа, в зависимости от погодных условий, рельефа местности и т. д.

Описанные выше подходы были применены при проектировании самого большого для России металлического купола диаметром 127 и высотой 42 м. Предложенная немецкими архитекторами ребристо-кольцевая схема в процессе проектирования была детально изучена, смоделирована и признана слишком тяжелой (2600 т). Анализ мировых аналогов в области куполостроения, а также широко известного купола в г. Хьюстон (США), позволили предложить более легкую схему (1600 т) Кайвита [4], отличающуюся равномерно распределенной несущей способностью элементов (рис. 5).

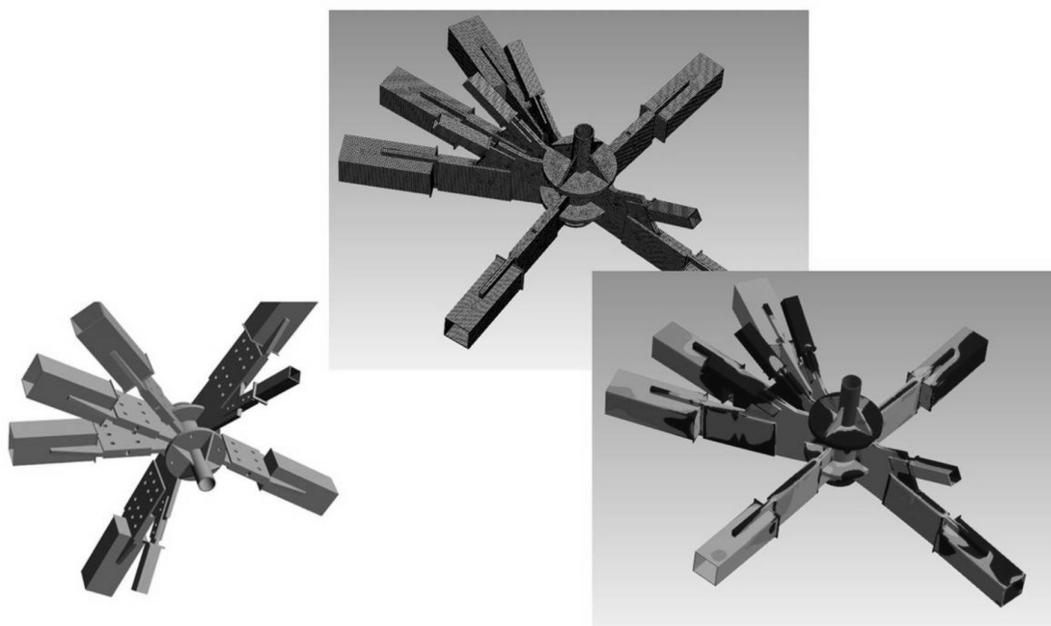


Рис. 6. Проектирование и расчет узлов в пространственной постановке

Суммарная экономия составила 1000 т стали, что эквивалентно сумме 60 млн руб.

Недостатки разработанной схемы купола – высокие требования к точности сварки и надежности узлов, а также отсутствие в нормативных документах методик по расчету и проектирова-

нию узлов подобной сложности. Для успешного проектирования узлов конструкции использовались подходы трехмерного проектирования и пространственного моделирования напряженно-деформированного состояния каждого узла в отдельности (рис. 6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. [Текст]/А.А. Самарский, А.П. Михайлов; 2-е изд., испр.–М.: Физматлит, 2001.–320 с.

2. Цытович, Н.А. Механика грунтов. [Текст]/Н.А. Цытович. –М.: Высш. шк., 1973.

3. Мангушев, Р.А. Современные свайные технологии [Текст]/Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. –СПбГАСУ, 2007.–160с.

4. Металлические конструкции: учеб. для студ. высш. учеб. завед. [Текст]/Под ред. Ю.И. Кудишина; 8-е изд., перераб. и доп.–М.: Изд. центр «Академия», 2006.–688 с.

УДК 621.396.6:004.942

А.В. Ненашев, А.С. Перистая

МЕТОД АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ

При разработке радиоэлектронных устройств используются системы схемотехнического моделирования, выполненные в виде пакетов компьютерных программ. При проектировании аналоговых устройств необходимо учитывать нелинейные свойства, присущие некоторым элементам схем. Задача создания методов анализа и моделирования в этом случае делится на две части: построение адекватных математических моделей нелинейных элементов, в частности, полупроводниковых приборов, и разработка методов исследования устройств в целом, с использованием таких моделей. Решение второй части, т. е. моделирование всего устройства с учетом нелинейных свойств, осуществляется методами, основы которых разработаны несколько десятилетий назад. Проблема заключается в том, что описание нелинейных элементов возможно только во временной области, а линейную инерционную часть схемы удобнее описывать в частотной, либо в области изображений Лапласа. Длительное время использовался метод численного решения нелинейных дифференциальных уравнений во временной области, реализованный в пакете про-

грамм PSpice. Он выходит из употребления из-за сложности получения результата в установившемся режиме. В популярном пакете Microwave Office применены два метода: рядов Вольтерра (РВ) и гармонического баланса (ГБ). Первый метод является математически строгим, если нелинейные зависимости точно описываются степенными рядами. Отклик схемы представляется в виде суммы слагаемых разных порядков, причем каждый следующий порядок вычисляется на основе предыдущих. Это может быть сделано как в частотной области, так и во временной. Метод применим лишь при малой нелинейности, когда достаточная точность представления обеспечивается рядами, не выше 3...5-го порядков. Метод ГБ является заведомо приближенным, т. к. основан на представлении отклика нелинейной части системы укороченными рядами Фурье с небольшим числом гармоник. Он строится в виде итерационной процедуры, сходимость которой не всегда возможно оценить заранее.

В [1, 2] предложен новый метод анализа и моделирования нелинейных радиоэлектронных устройств, в котором нелинейные элементы рас-

сматриваются как параметрические, т. е. их параметры изменяются под действием напряжений и токов. Составляются уравнения для функционалов, решение которых ищется в виде ряда последовательных приближений. Метод достаточно универсальный, однако для схем, содержащих более одного нелинейного элемента и несколько входов и выходов, могут возникнуть трудности при составлении и решении системы уравнений.

Постановка задачи – усовершенствовать разработанный метод так, чтобы можно было исследовать нелинейные радиоэлектронные устройства произвольной конфигурации и степени сложности. Полученный алгоритм должен быть пригоден для компьютерной реализации, поэтому его следует строить на известных приемах анализа линейных электрических схем.

Предлагается использовать теорему компенсации из теории цепей. Согласно этой теореме, двухполосники, в частности, нелинейные, входящие в схему, могут быть заменены зависимыми источниками тока или эдс. В результате подобной замены, в эквивалентной схеме нелинейные функции переходят в характеристики источников. При использовании метода последовательных приближений эти характеристики считаются известными по результатам предыдущего шага вычислений. Поэтому схема превращается в линейную и может быть рассчитана обычными способами. Затем снова определяются параметры зависимых источников и расчеты повторяются.

В качестве примера для решения поставленной задачи, предлагается рассмотреть широкополосный преобразователь частоты с квадратурным

мостом, описанный в [3]. Его упрощенная схема приведена на рис. 1.

Источник сигнала и гетеродин (на схеме не изображены) подключены через широкополосный квадратурный мост. Эквивалентная схема моста представляет собой восьмиполосник, матрицу проводимостей которого можно найти в [4]. Применены диоды с барьером Шоттки типа 2A120A, в схеме предусмотрено регулирование постоянной составляющей тока диодов с помощью внешнего смещения. Схема замещения диода аналогична используемой в SPICE-модели и представляет собой параллельное соединение нелинейной проводимости барьера Шоттки и его нелинейной емкости, последовательно с которыми включено активное объемное сопротивление RS , которое считается линейным. Вольтамперная и вольфарадная характеристики заданы функциями $i_d(v_{di}), C_d(v_{di})$, которые подобны используемым в SPICE-моделях (здесь не приводятся). Аргументом этих функций является «внутреннее» напряжение v_{di} , приложенное непосредственно к барьеру Шоттки. Для удобства моделирования из формулы $i_d(v_{di})$ следует получить нелинейную проводимость барьера:

$$G_d(v_{di}) = \begin{cases} i_d(v_{di})/v_{di}, & \text{при } v_{di} \neq 0; \\ di_d/dv_{di}, & \text{при } v_{di} = 0. \end{cases}$$

Проводимости и емкости диодов полагаются на каждом шаге вычислений параметрическими, т. е. изменяющимися во времени. В [5] показано, что наилучшая сходимость последовательных приближений получается, если начальное приближение соответствует линеаризованному ва-

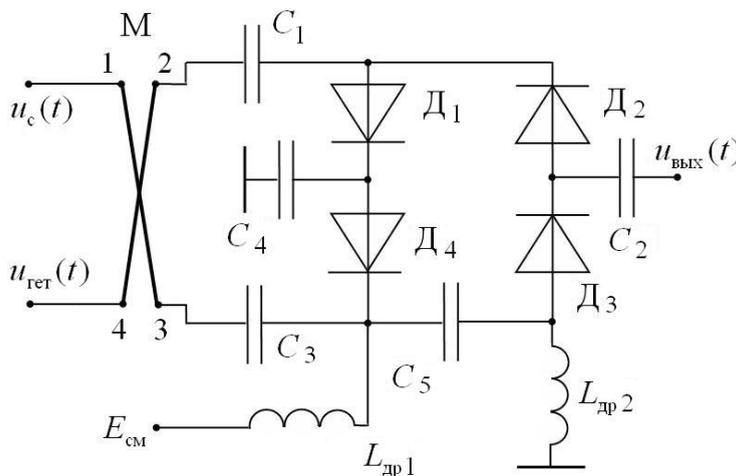


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема преобразователя

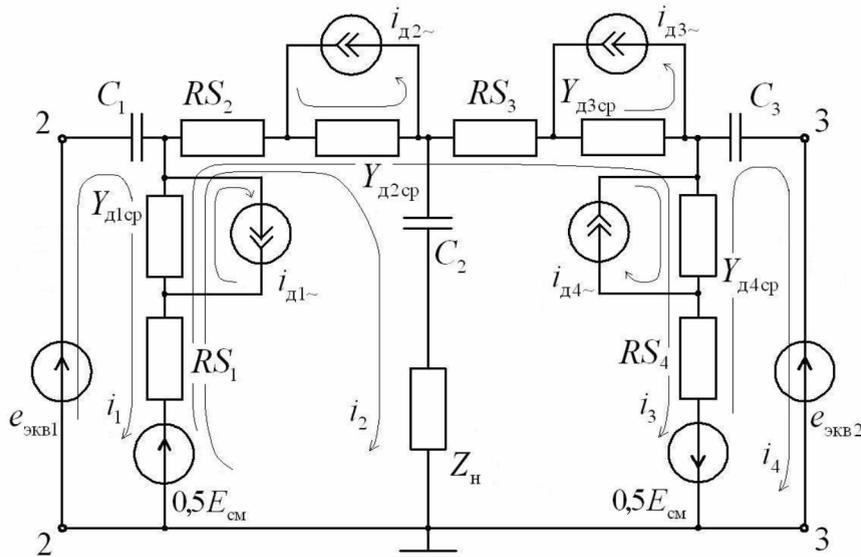


Рис. 2. Эквивалентная схема преобразователя

рианту. Поэтому каждый нелинейный параметр целесообразно представить в виде двух слагаемых: постоянного, равного среднему значению параметра, и переменного (параметрического). Постоянные части соответствуют линейным элементам, из которых составляется основа в виде линеаризованной схемы. Переменные части проводимостей и ёмкостей заменяются, по теореме компенсации, зависимыми нелинейными источниками тока $i_{д1\sim}, \dots, i_{д4\sim}$. В результате получается эквивалентная схема, приведенная на рис. 2, в которой точки 2 и 3 соответствуют одноименным точкам схемы на рис. 1.

В качестве основы для алгоритма расчетов используется метод контурных токов, который наиболее часто применяют при компьютерном моделировании. Токи i_1, \dots, i_4 обозначены на схеме; кроме них, в малых контурах, протекают токи, определяемые соответствующими генераторами.

Напряжения сигнала и гетеродина и коэффициенты передачи квадратурного моста учтены в эквивалентных эдс $e_{экв1}$ и $e_{экв2}$. Их изображения, в области преобразования Лапласа (ПЛ), имеют следующий вид:

$$E_{экв1}(s) = \frac{(U_c(s) + U_r(s))(Y_{12} + Y_{13}) + r_i(I_1(s) - I_4(s))(1 + Y_{11} + Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} + Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} + Y_{14})(Y_{11} + Y_{23})]} - \frac{(U_c(s) - U_r(s))(Y_{12} - Y_{13}) + r_i(I_1(s) + I_4(s))(1 + Y_{11} - Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} - Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} - Y_{14})(Y_{11} - Y_{23})]} \quad (1)$$

$$E_{экв2}(s) =$$

$$\frac{(U_c(s) + U_r(s))(Y_{12} + Y_{13}) + r_i(I_1(s) - I_4(s))(1 + Y_{11} + Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} + Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} + Y_{14})(Y_{11} + Y_{23})]} + \frac{(U_c(s) - U_r(s))(Y_{12} - Y_{13}) + r_i(I_1(s) + I_4(s))(1 + Y_{11} - Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} - Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} - Y_{14})(Y_{11} - Y_{23})]} \quad (2)$$

где s – комплексный аргумент ПЛ; r_i – внутреннее сопротивление источников сигнала и гетеродина; Y_{11}, Y_{12}, \dots – компоненты матрицы комплексных проводимостей моста [4], нормированные к проводимости источника $1/r_i$ (их зависимость от аргумента s не указана для экономии места). Сопротивление нагрузки Z_n представляет собой параллельное соединение резистора R_n и емкости C_n . Среднее значение проводимости диода D_1 : $Y_{д1cp} = G_{д1cp} + j\omega C_{д1cp}$, где $G_{д1cp}, C_{д1cp}$ – средние значения активной проводимости и емкости; $Y_{д2cp}, Y_{д3cp}, Y_{д4cp}$ – аналогичные величины для других диодов. Каждый из «переменных» токов $i_{д1\sim}, \dots, i_{д4\sim}$ вычисляется как разность полного тока соответствующего диода и тока через среднюю проводимость. Например, для первого диода:

$$i_{д1\sim}(t) = v_{д1}(t) \cdot \{G_{д1} [v_{д1}(t)] - G_{д1cp}\} + dv_{д1}(t)/dt \cdot \{C_{д1} [v_{д1}(t)] - C_{д1cp}\}. \quad (3)$$

Можно переписать (3) в области изображений, используя аппарат многомерного преобразования Лапласа (МПЛ) [2, 5]:

$$I_{д1\sim}(s) = \{V_{д1}(s_1)[G_{д1}(s_2) - G_{д1cp}] + s_1(C_{д1}(s_2) - C_{д1cp})\}^* \quad (4)$$

где $I_{д1-}(s) \xleftrightarrow{L} i_{д1-}(t)$, $V_{д1}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д1}(t)$, $G_{д1}(s) \xleftrightarrow{L} G_{д1}(t) = G_{д1}[v_{д1}(t)]$, $C_{д1}(s) \xleftrightarrow{L} C_{д1}(t) = C_{д1}[v_{д1}(t)]$; символ \xleftrightarrow{L} означает взаимное соответствие оригинала и изображения; символом $\{\circ\}^*$ обозначен переход от многомерного изображения Лапласа к одномерному. Для остальных диодов токи определяются аналогично. Разделительные конденсаторы C_1, C_2, C_3 имеют значительные номиналы и не оказывают заметного влияния на работу преобразователя.

Запишем систему уравнений для изображений контурных токов:

$$\begin{cases} I_1(s)[1/(s \cdot C_1) + 1/Y_{д1cp} + RS_1] - \\ - [I_2(s) + I_3(s)][RS_1 + 1/Y_{д1cp}] = \\ = I_{д1-}(s)/Y_{д1cp} + E_{экв1}(s) - 0,5 \cdot E_{см}, \\ I_2(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp} + RS_2 + 1/Y_{д2cp} + \\ + 1/(s \cdot C_2) + Z_n] - I_1(s)[1/Y_{д1cp} + RS_1] + \\ + I_3(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp} + RS_2 + 1/Y_{д2cp}] = \\ = 0,5 \cdot E_{см} - I_{д1-}(s)/Y_{д1cp} - I_{д2-}(s)/Y_{д2cp}, \\ I_3(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp} + RS_2 + 1/Y_{д2cp} + RS_3 + \\ + 1/Y_{д3cp} + RS_4 + 1/Y_{д4cp}] - I_1(s)[1/Y_{д1cp} + RS_1] + \\ + I_2(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp} + RS_2 + 1/Y_{д2cp}] - \\ - I_4(s)[1/Y_{д4cp} + RS_4] = E_{см} - I_{д1-}(s)/Y_{д1cp} - \\ - I_{д2-}(s)/Y_{д2cp} - I_{д3-}(s)/Y_{д3cp} - I_{д4-}(s)/Y_{д4cp}, \\ I_4(s)[1/Y_{д4cp} + RS_4 + 1/(s \cdot C_3)] - I_3(s)[RS_4 + 1/Y_{д4cp}] = \\ = -0,5 \cdot E_{см} - E_{экв2}(s) - I_{д4-}(s)/Y_{д4cp}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь, для компактности, величины $Y_{д1cp}, \dots, Y_{д4cp}$ и Z_n записаны без комплексного аргумента s . В уравнениях слагаемые, обусловленные «переменными» составляющими токов, помещаются в правых частях, поскольку они считаются известными по результатам предыдущего шага расчетов. Система уравнений (5) линейная и может быть решена любым из известных методов, в т. ч. с помощью компьютерных программ. Для решения в ручном режиме следует воспользоваться традиционным методом подстановки, выражая одни токи через другие. По найденным в результате решения токам $I_1(s), \dots, I_4(s)$, можно определить внутренние напряжения диодов:

$$V_{д1}(s) = [I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) - I_{д1-}(s)]/Y_{д1cp}(s), \quad (6)$$

$$V_{д2}(s) = -[I_2(s) + I_3(s) + I_{д2-}(s)]/Y_{д2cp}(s), \quad (7)$$

$$V_{д3}(s) = -[I_3(s) + I_{д3-}(s)]/Y_{д3cp}(s), \quad (8)$$

$$V_{д4}(s) = [I_4(s) - I_3(s) - I_{д4-}(s)]/Y_{д4cp}(s). \quad (9)$$

От изображений следует перейти во временную область $V_{д1}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д1}(t)$, $V_{д2}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д2}(t)$, $V_{д3}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д3}(t)$, $V_{д4}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д4}(t)$. Полученные напряжения могут быть использованы для нахождения параметров нелинейных элементов и других величин, необходимых для следующего цикла вычислений.

Моделирование начинается, как в любой системе схмотехнических расчетов, с определения режима по постоянному току. В нашем случае он определяется внешним смещением $E_{см}$, которое поровну делится между четырьмя диодами. В этом состоянии определяются исходные значения параметров $Y_{д1}(s) = G_{д1} + sC_{д1}, \dots, Y_{д4}(s) = G_{д4} + sC_{д4}$, где $G_{д1}, \dots, G_{д4}$ и $C_{д1}, \dots, C_{д4}$ – значения проводимостей и емкостей диодов при заданном смещении. Эти величины подставляются в уравнения (5) вместо средних значений параметров. Начальный шаг вычислений соответствует линеаризованной схеме, поэтому «переменные» составляющие токов $I_{д1-}(s), \dots, I_{д4-}(s)$ на этом этапе равны нулю. Начальные версии эквивалентных эдс $E_{экв1}(s)$ и $E_{экв2}(s)$, поскольку токи $I_1(s), \dots, I_4(s)$ еще не найдены, можно определить по правилам теории линейных цепей, либо приближенно, т. к. в дальнейших циклах происходит их уточнение. В результате решения системы уравнений (5) получаются начальные приближения к токам $I_{1(0)}(s), \dots, I_{4(0)}(s)$, а по формулам (6)–(9), соответственно, начальные приближения $V_{д1(0)}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д1(0)}(t)$, $V_{д2(0)}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д2(0)}(t)$, $V_{д3(0)}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д3(0)}(t)$, $V_{д4(0)}(s) \xleftrightarrow{L} v_{д4(0)}(t)$ к внутренним напряжениям диодов. Здесь и далее нижний индекс, в скобках, обозначает номер приближения к токам или напряжениям, либо номер соответствующей им версии законов изменения нелинейных параметров. По этим напряжениям с помощью соответствующих формул определяются нулевые версии параметров $G_{д1(0)}(t) = G_{д1}[v_{д1(0)}(t)]$, $C_{д1(0)}(t) = C_{д1}[v_{д1(0)}(t)]$, \dots , $G_{д4(0)}(t) = G_{д4}[v_{д4(0)}(t)]$, $C_{д4(0)}(t) = C_{д4}[v_{д4(0)}(t)]$, а также средние значения проводимостей $Y_{д1cp(0)}(s) = G_{д1cp(0)} + sC_{д1cp(0)}, \dots$, $Y_{д4cp(0)}(s) = G_{д4cp(0)} + sC_{д4cp(0)}$. Далее по формулам (3), (4) вычисляются «переменные» токи $I_{д1-(0)}(s) \xleftrightarrow{L} i_{д1-(0)}(t)$, \dots , $I_{д4-(0)}(s) \xleftrightarrow{L} i_{д4-(0)}(t)$, а по формулам (1), (2) – эквивалентные эдс $E_{экв1(0)}(s)$ и $E_{экв2(0)}(s)$, после чего начальный цикл вычислений завершен и можно приступать к следующему, в ходе которого будут найдены первые приближения для всех переменных.

Продолжение рассуждений, подобным образом, ведет к выражениям для произвольного k -го приближения:

$$\begin{aligned}
 & I_{1(k)}(s)[1/(s \cdot C_1) + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_1] - \\
 & - [I_{2(k)}(s) + I_{3(k)}(s)][RS_1 + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s)] = \\
 & = I_{д1\sim(k-1)}(s)/Y_{д1cp(k-1)}(s) + E_{эkv1(k-1)}(s) - 0,5 \cdot E_{см}, \\
 & I_{2(k)}(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_2 + 1/Y_{д2cp(k-1)}(s) + \\
 & + 1/(s \cdot C_2) + Z_H(s)] - I_{1(k)}(s)[1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_1] + \\
 & + I_{3(k)}(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_2 + 1/Y_{д2cp(k-1)}(s)] = \\
 & = 0,5 \cdot E_{см} - I_{д1\sim(k-1)}(s)/Y_{д1cp(k-1)}(s) - \\
 & - I_{д2\sim(k-1)}(s)/Y_{д2cp(k-1)}(s), \\
 & I_{3(k)}(s)[RS_1 + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_2 + 1/Y_{д2cp(k-1)}(s) + \\
 & + RS_3 + 1/Y_{д3cp(k-1)}(s) + RS_4 + 1/Y_{д4cp(k-1)}(s)] - \\
 & - I_{1(k)}(s)[1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_1] + I_{2(k)}(s)[RS_1 + \\
 & + 1/Y_{д1cp(k-1)}(s) + RS_2 + 1/Y_{д2cp(k-1)}(s)] - \\
 & - I_{4(k)}(s)[1/Y_{д4cp(k-1)}(s) + RS_4] = \\
 & = E_{см} - I_{д1\sim(k-1)}(s)/Y_{д1cp(k-1)}(s) - \\
 & - I_{д2\sim(k-1)}(s)/Y_{д2cp(k-1)}(s) - I_{д3\sim(k-1)}(s)/Y_{д3cp(k-1)}(s) - \\
 & - I_{д4\sim(k-1)}(s)/Y_{д4cp(k-1)}(s), \\
 & I_{4(k)}(s)[1/Y_{д4cp(k-1)}(s) + RS_4 + 1/(s \cdot C_3)] - \\
 & - I_{3(k)}(s)[RS_4 + 1/Y_{д4cp(k-1)}(s)] = -0,5 \cdot E_{см} - \\
 & - E_{эkv2(k-1)}(s) - I_{д4\sim(k-1)}(s)/Y_{д4cp(k-1)}(s). \\
 & V_{дi1(k)}(s) = [I_{1(k)}(s) - I_{2(k)}(s) - I_{3(k)}(s) - I_{д1\sim(k-1)}(s)]/Y_{д1cp(k-1)}(s), \quad (10) \\
 & V_{дi2(k)}(s) = -[I_{2(k)}(s) + I_{3(k)}(s) + I_{д2\sim(k-1)}(s)]/Y_{д2cp(k-1)}(s), \quad (11) \\
 & V_{дi3(k)}(s) = -[I_{3(k)}(s) + I_{д3\sim(k-1)}(s)]/Y_{д3cp(k-1)}(s), \quad (12) \\
 & V_{дi4(k)}(s) = [I_{4(k)}(s) - I_{3(k)}(s) - I_{д4\sim(k-1)}(s)]/Y_{д4cp(k-1)}(s), \quad (13) \\
 & G_{дi1(k)}(s) \xrightarrow{L} G_{дi1(k)}(t) = G_{дi1} [v_{дi1(k)}(t)], \\
 & C_{дi1(k)}(s) \xrightarrow{L} C_{дi1(k)}(t) = C_{дi1} [v_{дi1(k)}(t)], \\
 & Y_{д1cp(k)}(s) = G_{д1cp(k)} + s \cdot C_{д1cp(k)}, \dots, \\
 & G_{дi4(k)}(s) \xrightarrow{L} G_{дi4(k)}(t) = G_{дi4} [v_{дi4(k)}(t)], \\
 & C_{дi4(k)}(s) \xrightarrow{L} C_{дi4(k)}(t) = C_{дi4} [v_{дi4(k)}(t)], \\
 & Y_{д4cp(k)}(s) = G_{д4cp(k)} + s \cdot C_{д4cp(k)}, \\
 & I_{д1\sim(k)}(s) = \{V_{дi1(k)}(s_1)[(G_{дi1(k)}(s_2) - G_{д1cp(k)}) + \\
 & + s_1(C_{дi1(k)}(s_2) - C_{д1cp(k)})]\}^*, \dots, \\
 & I_{д4\sim(k)}(s) = \{V_{дi4(k)}(s_1)[(G_{дi4(k)}(s_2) - G_{д4cp(k)}) + \\
 & + s_1(C_{дi4(k)}(s_2) - C_{д4cp(k)})]\}^*, \\
 & E_{эkv1(k)}(s) = \\
 & = \frac{(U_c(s) + U_r(s))(Y_{12} + Y_{13}) + r_i(I_{1(k)}(s) - I_{4(k)}(s))(1 + Y_{11} + Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} + Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} + Y_{14})(Y_{11} + Y_{23})]} -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{(U_c(s) - U_r(s))(Y_{12} - Y_{13}) + r_i(I_{1(k)}(s) + I_{4(k)}(s))(1 + Y_{11} - Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} - Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} - Y_{14})(Y_{11} - Y_{23})]}, \\
 & E_{эkv2(k)}(s) = \\
 & = \frac{(U_c(s) + U_r(s))(Y_{12} + Y_{13}) + r_i(I_{1(k)}(s) - I_{4(k)}(s))(1 + Y_{11} + Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} + Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} + Y_{14})(Y_{11} + Y_{23})]} + \\
 & + \frac{(U_c(s) - U_r(s))(Y_{12} - Y_{13}) + r_i(I_{1(k)}(s) + I_{4(k)}(s))(1 + Y_{11} - Y_{14})}{2 \cdot [(Y_{12} - Y_{13})^2 - (1 + Y_{11} - Y_{14})(Y_{11} - Y_{23})]}.
 \end{aligned}$$

Конечным результатом моделирования является выходное напряжение преобразователя:

$$u_{вых(k)}(t) \xrightarrow{L} U_{вых(k)}(s) = I_{2(k)}(s)Z_H(s).$$

Вычисления продолжают до тех пор, пока относительная разность между соседними приближениями не станет меньше заданной величины.

Большинство приведенных соотношений построено с использованием преобразования Лапласа, что принципиально позволяет вести исследование как в переходном режиме, так и в установившемся. На практике во многих случаях представляет интерес установившийся режим. При этом от преобразования Лапласа следует перейти к преобразованию Фурье, что дает возможность при численном моделировании использовать прямое и обратное БПФ.

В случае использования метода последовательных приближений, всегда возникает вопрос о его сходимости. Если в уравнения входят функции, сходимость обеспечивается при выполнении так называемого «принципа сжимающих отображений» [5]. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения, поскольку необходим переход к другой форме представления уравнений. В нашем случае этот принцип будет выполняться, если разность между результатами соседних циклов вычислений будет сокращаться по мере увеличения номера цикла. В [1, 2] отмечено, что, если не принять специальных мер, область сходимости ограничивается сравнительно небольшими амплитудами входного воздействия, что недостаточно на практике. Там же указано, что существует простой способ обеспечения сходимости, который заключается в искусственном уменьшении разности между результатами текущего и предыдущего циклов вычислений. Для этого достаточно изменить вид уравнений (10)–(13), описывающих внутренние напряжения диодов:

$$\begin{aligned}
 & V_{дi1(k)}(s) = \Delta[I_{1(k)}(s) - I_{2(k)}(s) - I_{3(k)}(s) - \\
 & - I_{д1\sim(k-1)}(s)]/Y_{д1cp(k-1)}(s) + (1 - \Delta)V_{дi1(k-1)}(s),
 \end{aligned}$$

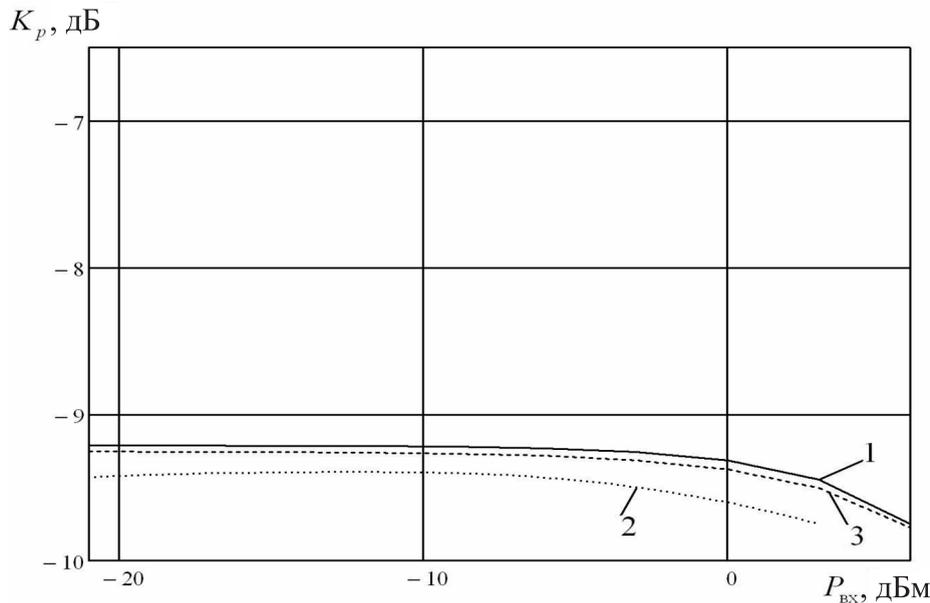


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи от входной мощности:
1 – предложенный метод; 2 – метод ГБ; 3 – моделирование в пакете MicroCap 7

$$\begin{aligned}
 V_{di2(k)}(s) &= -\Delta[I_{2(k)}(s) + I_{3(k)}(s) + \\
 &+ I_{д2\sim(k-1)}(s)]/Y_{д2cp(k-1)}(s) + (1 - \Delta)V_{di2(k-1)}(s), \\
 V_{di3(k)}(s) &= -\Delta[I_{3(k)}(s) + \\
 &+ I_{д3\sim(k-1)}(s)]/Y_{д3cp(k-1)}(s) + (1 - \Delta)V_{di3(k-1)}(s), \\
 V_{di4(k)}(s) &= \Delta[I_{4(k)}(s) - I_{3(k)}(s) - \\
 &- I_{д4\sim(k-1)}(s)]/Y_{д4cp(k-1)}(s) + (1 - \Delta)V_{di4(k-1)}(s),
 \end{aligned}$$

где $\Delta \leq 1$ выбирается из условия наиболее быстрой сходимости. Подробное рассмотрение вопроса о выборе Δ выходит за рамки данной статьи. Отметим только, что во многих случаях его можно определить методом подбора.

Для проверки и иллюстрации возможностей описанного метода были проведены расчеты при параметрах, подобных выбранным в [3]. Частота входного сигнала совпадает с центральной частотой квадратурного моста и равна 150 МГц, частота гетеродина 180 МГц. Уровень мощности гетеродина составляет 10 дБм. Оптимизация смещения не проводилась, $E_{cm} = 0$. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента передачи от уровня мощности входного сигнала, рассчитанная предложенным методом (линия 1), а также для сравнения – методом ГБ в пакете программ Microwave Office (линия 2) и методом моделирования во временной области в пакете MicroCap 7 (линия 3).

Видно, что результаты, полученные предложенным методом, весьма близки к результатам моделирования в MicroCap 7. Небольшое отличие объясняется, видимо, тем, что в настоящей статье использованы несколько упрощенные функции вольтамперной и вольтфарадной характеристик. Результаты метода гармонического баланса отличаются более существенно. Это подтверждает вывод, сделанный в [2], что в режиме большой нелинейности (который имеет место в нашем случае) метод ГБ дает заметную погрешность вычислений. На рис. 4 изображена зависимость относительного уровня продукта интермодуляции 3-го порядка от уровня входной мощности (1 – предложенный метод; 2 – MicroCap 7). Графики показывают, что результаты предложенного метода и моделирования в MicroCap 7 достаточно близки. Вычисления методом ГБ дают нереальные результаты, которые здесь не приведены: зависимость получается немонотонная, с отличиями от изображенных $\pm(15 \dots 20)$ дБ. Непригодность метода ГБ для исследования интермодуляции в преобразователях частоты подтверждается тем, что в руководствах по Microwave Office такое применение не рекомендовано.

Имеется возможность сравнить полученные результаты с приведенными в [3] расчетными и экспериментальными данными. При использованном там значении входной мощности 0 дБм,

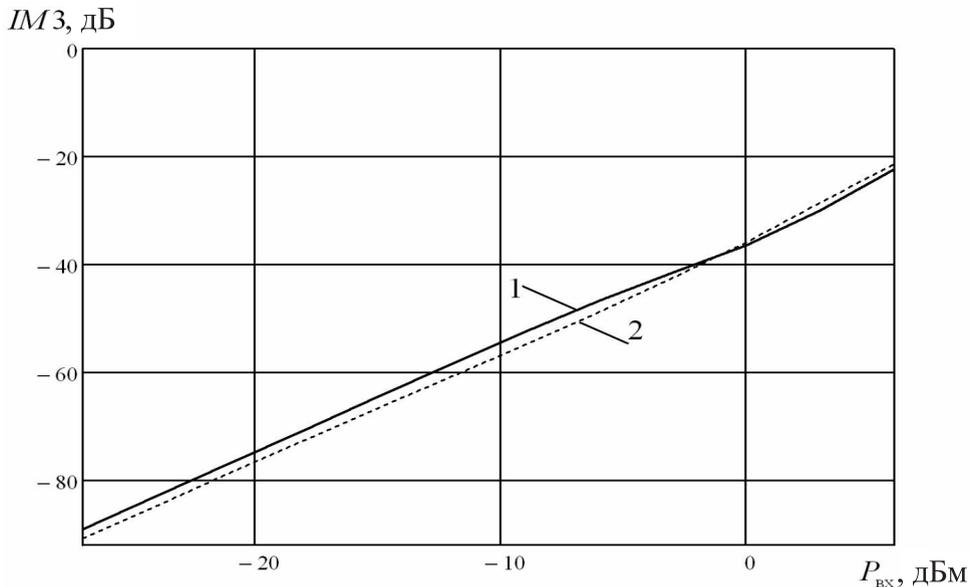


Рис. 4. Зависимость относительного уровня продукта интермодуляции 3-го порядка от входной мощности: 1 – предложенный метод; 2 – моделирование в пакете MicroCap 7

расчетный уровень интермодуляции 3-го порядка практически совпадает с нашим результатом. Экспериментально измеренный уровень составляет примерно -34 дБ, т. е. отличие от расчетного значения $2,5$ дБ. Это является достаточно хорошим совпадением для продукта высокого порядка. Значение экспериментально измеренного коэффициента передачи в [3] для входной мощности 0 дБ составляет 10 дБ, т. е. моделирование предложенным нами методом дает результат, отличный на $0,7$ дБ. Это вполне правдоподобно, поскольку в реальном образце всегда имеются потери сигнала, неучтенные при моделировании. Следует от-

метить, что моделирование по методике авторов [3] дает $-11,5$ дБ, т. е. расхождение с экспериментом $-1,5$ дБ.

В статье предложен метод моделирования и анализа нелинейных радиоэлектронных устройств, основанный на применении теоремы компенсации для нелинейных элементов схемы. Метод может быть положен в основу разработки комплекса компьютерных программ. Рассмотренный пример расчета и сравнение с опубликованными данными подтверждают достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ненашев, А.В.** Метод параметрических характеристик для анализа и моделирования нелинейных устройств [Текст]/А.В.Ненашев//Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.–2009.–Т. 52.–№ 11–С. 30–40.
2. **Ненашев, А.В.** Метод моделирования нелинейных радиотехнических устройств [Текст]/А.В. Ненашев, В.А. Охотников//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика, телекоммуникации, управление.–2009.–№ 5 (86).–С. 73–79.
3. **Мелихов, С.В.** Метод анализа и расчёта широкополосного преобразователя частоты в режиме сильных гармонических воздействий [Текст]/С.В. Мелихов, В.А. Кологривов//Радиотехника.–1999.–№ 1.–С. 38–45.
4. **Бова, Н.Г.** Микроэлектронные устройства СВЧ [Текст]/Н.Г. Бова, Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин [и др.].–К.: Техника/ 1984.–184 с.
5. **Пупков, К.А.** Функциональные ряды в теории нелинейных систем [Текст]/К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко.–М.: Наука, 1976.–448 с.

УДК 621.226(075.8)

А.А. Жарковский, Н.Н. Куриков, П.В. Пугачев, Н.Н. Шабров

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ

Оценка качества и проектирование центробежных насосов и других турбомашин в настоящее время ведется с использованием трехмерных методов математического моделирования проточных частей и гидродинамического расчета течения в них. От точности применяемых методов и возможностей современных технологий визуализации течения зависит качество проектирования. Цель данной статьи – оценка возможности расчета течения, потерь и прогнозирования характеристик консольных центробежных насосов со спиральным отводом на основе расчета течения вязкой жидкости. Визуализация течения в проточной части выполнена средствами гидродинамического программного комплекса Fluent [1] с помощью новых технологий пространственного представления результатов расчета течения [2].

Расчет характеристик насоса

Расчет трехмерного вязкого течения проведен на основе уравнений Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{aligned}$$

где $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$ – осредненные по времени значения скоростей; $\bar{u}'_1, \bar{u}'_2, \bar{u}'_3$ – пульсационные составляющие скоростей; слагаемое f_i выражает действие центробежных и кориолисовых сил. Для замыкания уравнений Рейнольдса использована *RNG k – ε* модель турбулентности. Количество элементов расчетной сетки $1,2 \cdot 10^6$.

Расчитаны течение и прогнозные характеристики центробежного насоса с низким коэффициентом быстроходности $n_s = 40$. Модель расчетной области течения в проточной части ступени насоса представлена на рис. 1. Параметры потока на выходе из РК передавались в спиральный отвод (СО) через поверхность-интерфейс с условием «frozen rotor» («замороженный ротор»), когда в процессе расчета роторные элементы проточной части полагаются зафиксированными в опреде-

ленном угловом положении относительно стартовых элементов. Осреднение на поверхности интерфейса не выполнялось, что позволило моделировать воздействие следа от лопасти одного элемента на течение в канале следующего элемента. Наличие спирального отвода означало отсутствие окружной симметрии потока в РК, что требовало расчета течения в РК во всех межлопастных каналах. Расчетные ячейки в ядре потока представляли собой тетраэдры. Вблизи входных и выходных кромок РК и поверхности интерфейса производилось сгущение элементов. Вблизи твердых стенок были созданы слои призматических ячеек для достижения равномерной точности расчета в местах быстрого изменения параметров течения. На входе в расчетную область задавалась расходная скорость. На выходе ставились мягкие условия. На твердых стенках было задано условие прилипания к гладкой стенке. Расчет проводился в стационарной постановке.

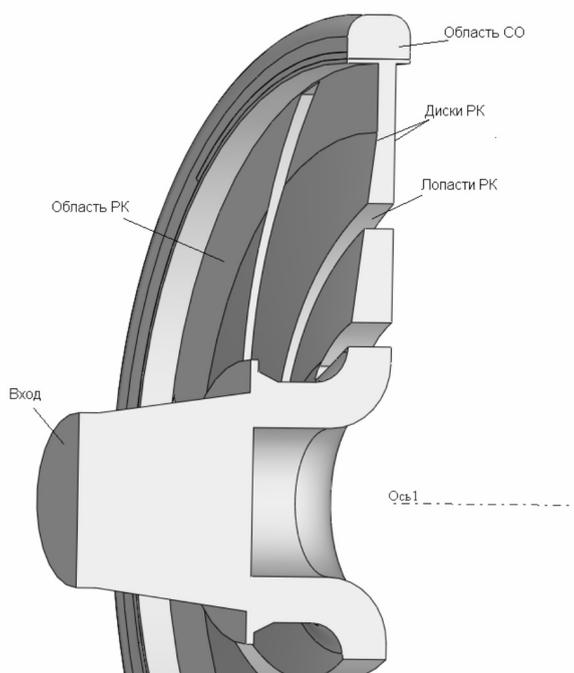


Рис. 1. Модель проточной части насоса

Расхождение расчета и эксперимента по коэффициенту напора $\psi_2 = \frac{H}{U_2^2/g}$ ($U_2 = \omega \cdot R_2$) (рис. 2) составило 1 %. Зависимость КПД от коэффициента расхода $\varphi_2 = \frac{V_{m2}}{U_2}$ (V_{m2} – меридианная скорость на выходе РК) насоса представлена на рис. 3. Видно, что значение КПД достаточно хорошо согласуется с экспериментом в зоне оптимальных подач и несколько хуже в остальной области. На рис. 4 представлены зависимости гидравлических потерь в элементах проточной части: рабочем колесе и спиральном отводе. Расчет позволяет адекватно описать течение в проточной части консольного насоса низкой быстроходности со спиральным отводом. На рис. 5 представлены результаты расчета полей относительных скоростей в каналах рабочего колеса и спирального отвода на средней их высоте (сечении) при номинальном расходе. Можно видеть, что течение в каналах

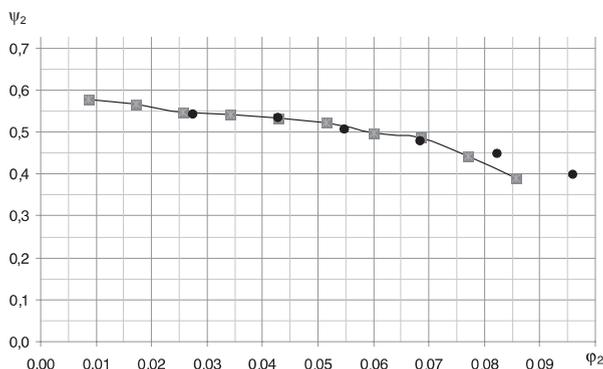


Рис. 2. Напорная характеристика насоса

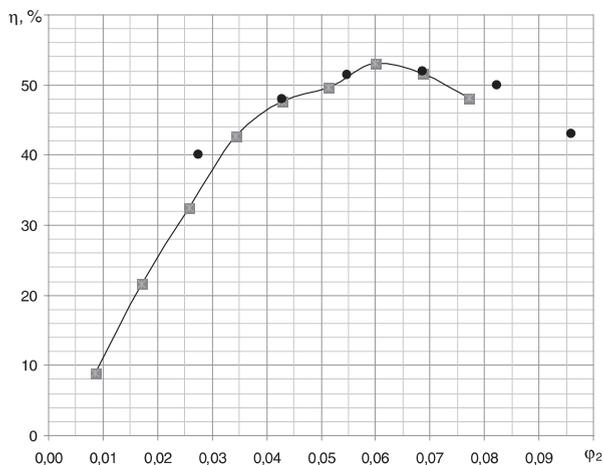


Рис. 3. Зависимость КПД от подачи насоса

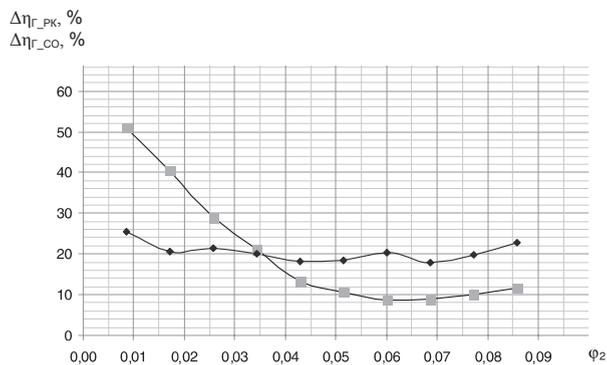


Рис. 4. Гидравлические потери в РК и СО

РК, занимающих различное положение относительно «зуба» спирального отвода, качественно различно. Это говорит о том, что течение в каналах РК носит нестационарный характер даже на номинальном режиме.

Визуализация результатов

Визуализация результатов расчета выполнялась по новой технологии визуализации больших потоков данных на основе созданного на ММФ программно-аппаратного комплекса виртуальной реальности CAVE 3D, а также с помощью технологии индуцированной реальности.

Визуализация в системе CAVE 3D. Системы виртуальной реальности типа CAVE 3D на сегодняшний день предоставляют самые передовые технологии визуализации больших и сверхбольших объемов данных, когда традиционные средства визуализации становятся недостаточными для быстрого и полного восприятия и понимания результатов исследований.

Система CAVE 3D представляет собой программно-аппаратный комплекс, основные компоненты которого: проекционно-экранное оборудование (три просветных экрана и шесть проекторов), высокопроизводительный видео-кластер, оптическая трекинг-система, программное обеспечение.

Главное назначение системы CAVE 3D – исследования в области виртуального прототипирования. Виртуальное прототипирование – это современный подход к разработке новой продукции, основанный на инновационных технологиях воспроизведения виртуального образа продукта и полного погружения в его виртуальный мир перед запуском в реальное производство. В комплексе с



Рис. 5. Визуализация в системе CAVE 3D потока жидкости и поля давлений в центробежном лопастном насосе

физическим моделированием объекта виртуальное прототипирование позволяет существенно сократить сроки создания и стоимость конкурентоспособной продукции машиностроения.

Пример визуализации результатов моделирования в пакете Fluent гидродинамических процессов в центробежном лопастном насосе показан на рис. 5. Имеющаяся в ЦКП «Компьютерные технологии проектирования и моделирования в системах виртуальной реальности» СПбПУ ММФ система CAVE 3D позволяет визуализировать любые компьютерные модели объектов и процессов, независимо от программного обеспечения, используемого для моделирования.

Визуализация с помощью технологии индуцированной реальности. Технология индуцированной реальности, основанная на создании гибридных моделей, наряду с технологией виртуальной реальности – перспективное средство, упрощающее процесс восприятия и понимания результатов, полученных с помощью больших моделей.

Гибридной моделью является комбинация реального физического объекта и некоторого виртуального объекта – компьютерной модели. Виртуальный объект содержит дополнительную информацию о реальном объекте, которая отсутствует в визуальном восприятии человека (ко-

личественные характеристики физических процессов, связанных с реальным объектом – поля температур, давлений, скоростей, структуры потоков, электромагнитные поля и т. д.), либо является самостоятельным объектом. Гибридный прототип позволяет не заменять реальный исследуемый объект его электронной моделью, оставаясь в рамках реального взаимодействия с предметом. Тем самым, наличие реального объекта позволяет человеку максимально полно воспринимать его и исследуемые процессы или объекты, связанные с ним.

Технология создания гибридных моделей заключается в совмещении изображения визуализированного объема данных и изображения, регистрируемого видеокамерой. Взаимное положение этих изображений однозначно задается путем расположения системы координат, связанной с виртуальным объектом, в системе координат реального пространства. Последняя может быть задана, в частности, путем «графической регистрации» определенных объектов в пространстве. На каждом кадре, поступающем с видеокамеры, происходит поиск заранее известных объектов, определяются их размеры и ориентации в кадре. Такими объектами могут быть либо маркеры, расположенные неподвижно в пространстве в поле зрения видеокамеры, либо сами объекты реальной среды.

Создание гибридных моделей неразрывно связано с компьютерным моделированием как самого объекта, так и связанного с ним процесса.

С целью демонстрации применения технологии индуцированной реальности к визуализации результатов моделирования была создана гибридная модель центробежного лопастного насоса. Поскольку насоса как реального объекта не существует, потребовалось создание его трехмерной модели в пакете Pro/Engineer по имеющимся чертежам. Затем по созданной CAD модели на установке лазерного спекания был получен полномасштабный макет насоса. Процесс изготовления макета заключается в следующем. В программной среде установки лазерного спекания Sinterstation NiQ SLS CAD-модель условно рассекается большим количеством параллельных плоскостей, получается некоторое количество «слоев». Объект изготавливается послойно: раскатывается тонкий слой полиамидного порошка, на который с помощью лазера оказывается высокотемпературное воздействие на области, определяемой формой

слоя из CAD-модели. Порошок спекается, затем наносится следующий слой, и процесс повторяется. Полный процесс создания макета от чертежа до реального объекта показан на рис. 6.

На заключительном этапе создания гибридной модели происходит объединение изображений реального и виртуального объектов, что проиллюстрировано на рис. 7.

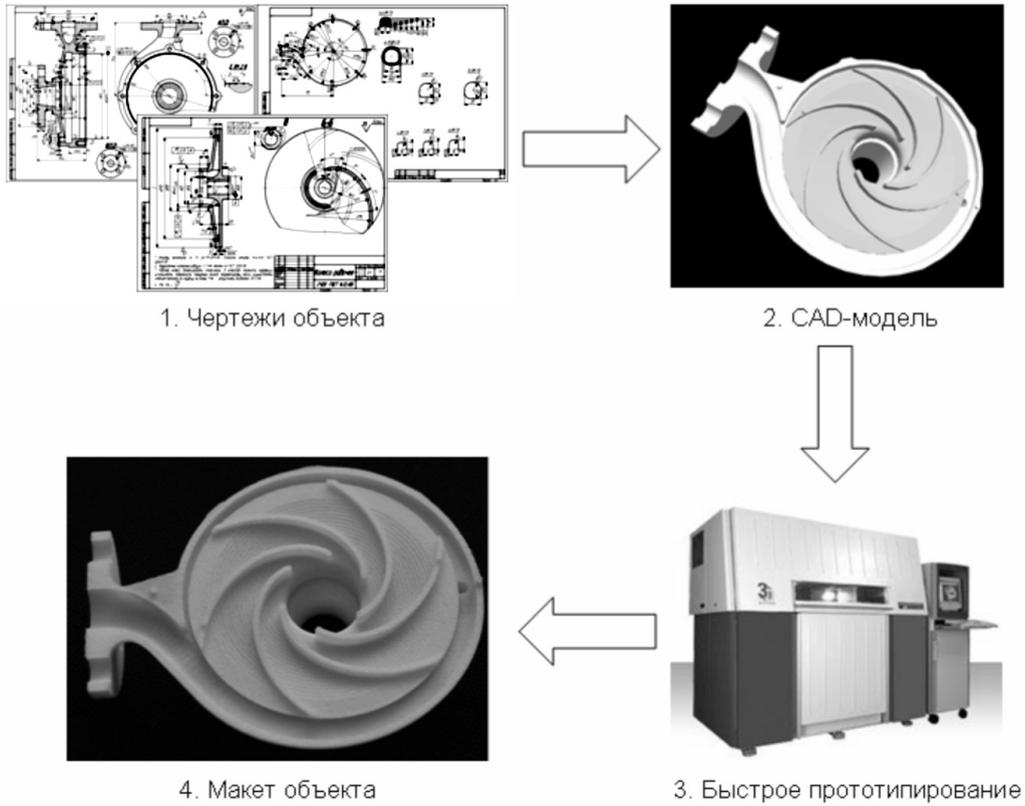


Рис. 6. Этапы создания макета насоса

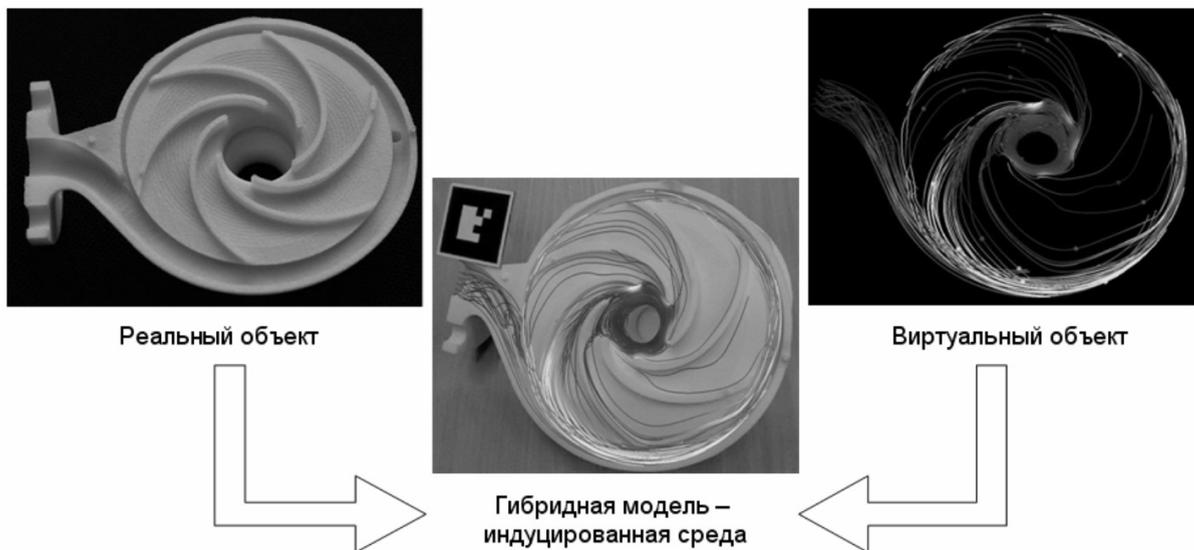


Рис. 7. Гибридная модель насоса

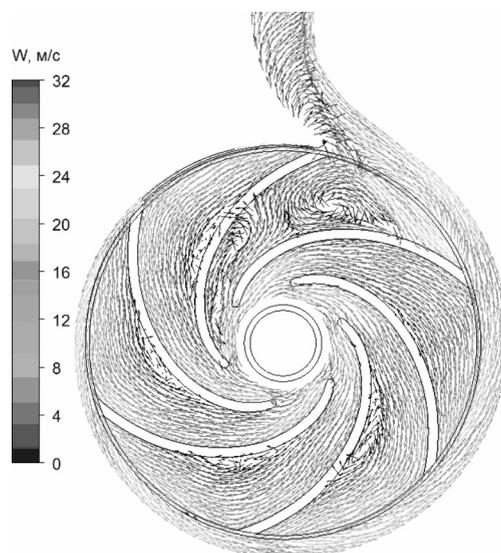


Рис. 8. Распределение относительных скоростей при $\bar{Q} = 1,0$

Из анализа результатов расчета течения в насосе можно сделать следующие выводы (см. рис. 8).

Большая часть гидравлических потерь (55÷60 %) сосредоточена в спиральном отводе, конкретно в его спиральной части. Изменить эту составляющую гидравлических потерь можно за

счет расширения сечений спиральной камеры.

Гидравлические потери в РК связаны с существенными отрывными зонами потока в РК. Ликвидировать зоны отрыва можно уменьшив диффузорность межлопастных каналов, например, за счет проектирования рабочего колеса с большим числом лопастей ($z = 8-9$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FLUENT 6.3, Documentation [Электронный ресурс].—Fluent inc. 2005 г.

2. COVISE 6.5.0 Documentation [Электронный ресурс].

УДК 666.1.037.5

В.С. Нагорный, Н.С. Пщелко

ОСНОВЫ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ПРИ ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНОМ ФОРМИРОВАНИИ

В последнее десятилетие ведущими мировыми фирмами и научными коллективами ведутся интенсивные разработки новых способов синтеза многокомпонентных жидкостей с наночастицами металла [1–11], предназначенных для использования в технологиях управляемого получения наноструктурированных проводящих топологий на

различных носителях в различных приложениях. Металлами в таких жидкостях являются наночастицы меди [1], меди и серебра [2, 3], меди и железа [6], золота [4, 5], серебра [7–11].

Предложен [11] новый электрокаплеструйный метод управляемого от ЭВМ формирования без фотолитографического процесса проводящих

топологий с заданными электрофизическими параметрами с использованием наноструктурированных металлом рабочих жидкостей. Причем базовым металлом в них являются наночастицы серебра, обладающие наибольшей электропроводностью.

Данное электрокаплевое оборудование и технологии базируются на создании высоким давлением (с использованием микропроцессоров или микроЭВМ) линейного потока монодисперсных капель наноструктурированной серебром рабочей жидкости (таких капель может быть сформировано до ста тысяч в секунду на одном сопле) одинакового диаметра (десятки, сотни микрометров), находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга. При этом любой выбранной капле рабочей жидкости (из этой последовательности) можно при необходимости сообщать заданную величину электрического заряда того или иного знака и управлять ею, отклоняя в электрическом поле данную каплю в заданную точку, определяемую технологическим процессом. Синхронизация дробления струи рабочей жидкости на монодисперсные капли производится от пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), который, меняя свои геометрические параметры за счет обратного пьезоэффекта под действием гармонического управляющего электрического сигнала, вносит вынужденные возмущения в вытекающую струю рабочей жидкости. При этом расстояние между каплями в линейной последовательности капель равно длине волны возмущения $\lambda = v/f$ от ПЭП, где v – средняя скорость струи рабочей жидкости; f – частота электрического напряжения на электродах ПЭП. Частота каплеобразования равна частоте f напряжения на электродах ПЭП.

Преимуществами и отличиями таких электрокаплевых технологий от известных являются:

- микропрограммное управление процессами получения линейного потока монодисперсных капель рабочей жидкости с одинаковым расстоянием между каплями, сообщения управляемого как по величине, так и по знаку электрического заряда каплям, отклонения заряженных капель в электрическом поле, что обеспечивает гибкость управления;
- бесконтактное нанесение рабочих жидкостей (заряженных и незаряженных) на объекты с любой формой поверхностей из различных материалов;

- использование на одном и том же оборудовании различных наноструктурированных металлом рабочих жидкостей и реализация требуемых проводящих топологий на различных носителях из различных материалов;

- высокие быстродействие и производительность. В предложенном методе на одном сопле можно получить 100 000 и более капель в секунду, в то время как в существенно инерционном способе «капля по требованию» с эмиссией капель импульсным давлением [2, 9]), когда формируется от ПЭП одна единственная капля на каждый электрический сигнал, на одном сопле получают только до 20 000 капель в секунду;

- низкая стоимость, простота оборудования.

Особенность ситуации в данной области науки состоит в том, что электрокаплевые технологии получения проводящих пленок на различных носителях разрабатываются параллельно с созданием для них наноструктурированных металлом рабочих жидкостей. Инженеры внимательно следят за разработками химиков, а ведущие химические фирмы заинтересованы в практическом применении их разработок. На сегодняшний день имеются единичные случаи комплексного использования в отдельных областях техники и науки электрокаплевых технологий с уже созданными рабочими жидкостями. Причем это касается только технологий получения капли по требованию методом импульсного давления [2, 9]. Применительно к предложенному [11] электрокаплевому методу высокого давления получения проводящих пленок с требуемыми (заданными) электрическими параметрами наноструктурированные металлом рабочие жидкости только находятся в стадии разработки [11], поскольку уже существующие [1–10] не пригодны для его реализации. Актуальной задачей при этом является оценка возможностей разрабатываемого метода.

Впервые в настоящей статье решается задача разработки математических моделей (при принятых моделях контакта наночастиц металла друг с другом на подложке) и теоретических основ расчета электрического сопротивления формируемых электрокаплевом методом высокого давления проводящих наноструктурированных пленок. Одной из целей является расчет электрических параметров формируемых пленок в зависимости от среднего диаметра наночастиц серебра и процентного массового содержания серебра в капле, числа наносимых на единицу по-

верхности подложки таких капель для получения проводящей пленки заданного сопротивления с учетом высокой производительности электрокапле-струйного метода.

Исследования показали [1–10], что при получении жидкостей с наночастицами металла вне зависимости от применяемого метода синтеза в них наночастицы металла имеют разные размеры, форму и распределены по различным законам. Поэтому при разработке математических моделей расчета электрического сопротивления формируемых пленок используем те или иные приближения.

Предположим, что наночастицы металла, из которых состоит формируемая пленка, являются кубиками со стороной d_{nm} , вплотную прилегающими друг к другу. Здесь d_{nm} – средний диаметр наночастиц металла в рабочей жидкости. То есть рассмотрим вначале предельный случай возможности формирования электрокапле-струйным методом сплошной проводящей пленки.

Масса наноструктурированного металла, нанесенного на поверхность носителя информации (подложки) после испарения жидкости:

$$m_m = \rho_m S_{пл} h_{пл}^{спл}, \quad (1)$$

где ρ_m – объемная плотность металла; $S_{пл}$, $h_{пл}^{спл}$ – соответственно, площадь и толщина сплошной металлической пленки на подложке.

Тогда имеем для толщины сплошной металлической пленки на подложке:

$$h_{пл}^{спл} = \frac{anm_{1k}}{\rho_m S_{пл}} = \frac{\pi an_s d_k^3 \rho_k}{6\rho_m}, \quad (2)$$

где m_{1k} – масса одной капли рабочей жидкости; $a = m_m / m_{nk} = m_{1m} / m_k$ – массовая доля наночастиц металла (серебра) в наносуспензированной капле рабочей жидкости; m_{nk} – масса всех n капель, нанесенных на поверхность носителя информации (подложки); m_{1m} – масса наночастиц металла в одной капле рабочей жидкости; n_s – число капель рабочей жидкости, наносимых на единицу площади носителя информации; d_k , ρ_k – диаметр и средняя плотность капли наносуспензированной металлом рабочей жидкости.

Определим среднюю плотность капли наносуспензированной металлом рабочей жидкости:

$$\begin{aligned} \rho_k &= \frac{m_{1k}}{V_1} = \frac{\rho_m V_{1m} + \rho_{ж} (V_1 - V_{1m})}{V_1} = \\ &= \rho_m \frac{V_{1m}}{V_1} + \rho_{ж} \left(1 - \frac{V_{1m}}{V_1} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где V_1 – объем капли рабочей жидкости с наночастицами металла; V_{1m} – объем металла в наносуспензированной капле рабочей жидкости; $\rho_{ж}$ – объемная плотность жидкости в наносуспензированной металлом капле.

С учетом того, что $V_1 = m_{1k} / \rho_{ж}$ и $V_{1m} = m_{1m} / \rho_m$, из (3) находим выражение для средней плотности капли наносуспензированной металлом рабочей жидкости:

$$\rho_k = \frac{\rho_{ж}}{1 - a \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_m} \right)}. \quad (4)$$

Подставляя соотношение (4) в уравнение (2), имеем для толщины сплошной металлической пленки на подложке, формируемой электрокапле-струйным методом:

$$h_{пл}^{спл} = \frac{\pi an_s d_k^3 \rho_{ж}}{6\rho_m \left[1 - a \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_m} \right) \right]}. \quad (5)$$

Таким образом, получено выражение (5), связывающее толщину $h_{пл}^{спл}$ проводящей сплошной металлической пленки на подложке в зависимости от среднего диаметра капель d_k , от числа капель наносуспензированной металлом рабочей жидкости, наносимых на единицу площади носителя информации n_s , от массовой доли наночастиц металла (серебра) в наносуспензированной капле рабочей жидкости a и от физических параметров жидкости и наночастиц металла в ней.

Тогда удельное электрическое сопротивление формируемой электрокапле-струйным методом тонкой сплошной металлической пленки $\rho_{пл}^{эспл}$ в зависимости от ее толщины можно оценить аналогично [12] по формуле:

$$\rho_{пл}^{эспл} = \rho_{мпл}^3 \left(1 + \frac{l_e}{h_{пл}^{спл}} \right), \quad (6)$$

где $\rho_{мпл}^3$ – удельное электрическое сопротивление очень толстой пленки, формируемой также электрокапле-струйным методом; l_e – средняя длина свободного пробега электрона в соответствующем массивном металле.

В свою очередь, удельное электрическое сопротивление $\rho_{мпл}^3$ такой наноструктурированной пленки зависит от структуры пленки, в частности, от размеров наночастиц металла. Поэтому при нахождении $\rho_{мпл}^3$ необходимо учесть явления на границе наночастиц и другие факторы, влияющие на ее сопротивление. Исходя из этих соображений, в первом приближении по аналогии с (6), само значение $\rho_{мпл}^3$ оценим как

$$\rho_{\text{пл}}^{\circ} = \rho_0^{\circ} \left(1 + \frac{l_e}{d_{\text{нм}}} \right), \quad (7)$$

где ρ_0° – удельное электрическое сопротивление проводника из соответствующего металла большого сечения («объемного металла»), которое берется из справочных данных для данного металла (см., например, [14]); $d_{\text{нм}}$ – средний диаметр наночастиц металла в рабочей жидкости.

Тогда из (6) и (7) получим:

$$\rho_{\text{пл}}^{\circ} = \rho_0^{\circ} \left(1 + \frac{l_e}{d_{\text{нм}}} \right) \left(1 + \frac{l_e}{h_{\text{пл}}^{\text{спл}}} \right). \quad (8)$$

Подставляя в (8) вместо толщины $h_{\text{пл}}^{\text{спл}}$ пленки выражение (5), имеем для удельного электрического сопротивления тонкой наноструктурированной металлической пленки, формируемой на подложке электрокаплетруйным способом с использованием наносупензированной металлом рабочей жидкости:

$$\rho_{\text{пл}}^{\text{эспл}} = \rho_0^{\circ} \left(1 + \frac{l_e}{d_{\text{нм}}} \right) \left\{ 1 + \frac{6l_e [\rho_{\text{м}} - a(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ж}})]}{\pi a n_s d_k^3 \rho_{\text{ж}}} \right\}. \quad (9)$$

На основании выражения (9) можно обоснованно выбирать диаметр капель d_k и число капель n_s наносимых на единицу площади подложки в зависимости от:

массовой доли a наночастиц металла (серебра) в наносупензированной капле рабочей жидкости;

среднего диаметра $d_{\text{нм}}$ наночастиц металла в рабочей жидкости;

удельного электрического сопротивления ρ_0° «объемного» массивного металла (справочные данные), положенного в основу получения наночастиц из данного металла при создании рабочей жидкости электрокаплетруйных технологий;

объемной плотности рабочей жидкости $\rho_{\text{ж}}$ в наносупензированной металлом капле и объемной плотности $\rho_{\text{м}}$ самого металла в капле.

Рассмотрим более точную (но также приближенную) физико-математическую модель, когда сформированная на подложке электрокаплетруйным способом металлическая пленка состоит из расположенных вплотную металлических шарообразных наночастиц, имеющих друг с другом лишь точечный контакт. Очевидно, что данный контакт обладает большим сопротивлением, чем это следует из выражения (9). Наночастицы металла по данной модели соприкасаются друг с другом в одной точке и площадь контакта мала.

При рассмотрении электропроводности таким образом сформированных электропроводящих наноструктурированных пленок необходимо учесть, что пленка представляет собой расположенные вплотную друг к другу металлические шарики, и поэтому ее плотность меньше плотности сплошной пленки во столько же раз, во сколько отличаются объемы куба и вписанного в него шара, то есть в $\frac{6}{\pi}$ раз. В этой связи с учетом (5) выражение для толщины пленки примет вид:

$$h_{\text{пл}} = \frac{a n_s d_k^3 \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{м}} \left[1 - a \left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{м}}} \right) \right]}. \quad (10)$$

Кроме того, при расчете электрического сопротивления надо учитывать квантово-механические явления, в частности, волновые свойства электрона. Известно [12], что в электропроводности в металлах могут принимать лишь электроны с энергиями больше энергии Ферми W_F . Длина волны де-Бройля электронов проводимости в металле может быть оценена как

$$\lambda = \frac{h}{m_e v_F} = \frac{h}{\sqrt{2m_e W_F}}, \quad (11)$$

где m_e – масса электрона; v_F – тепловая скорость рассматриваемых электронов; h – постоянная Планка.

Расчет по (11) для серебра дает значение $\lambda = 0,552$ нм. Таким образом, для грубой оценки можно считать, что растекание тока в металлических наночастицах происходит не из точечного контакта нулевой площади, а из электрода радиусом $r \approx \lambda$. Это значение хоть и соизмеримо, но все же значительно меньше, чем типичный размер металлических наночастиц, используемых в электрокаплетруйных технологиях [1–11]. Поэтому в первом приближении можно считать, что растекание тока в металлическую частицу в данном случае происходит примерно так же как в бесконечную среду. Известно, что в этом случае сопротивление растекания в материал с удельным сопротивлением ρ° составляет величину $\rho^{\circ}/(2\pi r)$. С учетом того, что металлическая наночастица имеет такие контакты с двух сторон, ее сопротивление будет вдвое больше и в принятых выше обозначениях составит:

$$R_{\text{кон}} = \frac{\rho_{\text{мпл}}^{\circ}}{\pi \lambda}. \quad (12)$$

Если же считать, что пленка сплошная, как это и делалось при выводе формулы (8), т. е. на-

ночастицы, из которых состоит пленка, являются кубиками с ребром $d_{\text{нм}}$, вплотную прилегающими друг к другу, то сопротивление металлической частицы будет:

$$R = \frac{\rho_{\text{мпл}}^3}{d_{\text{нм}}} \quad (13)$$

Таким образом, сравнивая (12) и (13), заключаем, что с учетом волновых свойств электрона и отсутствием контакта по всей площади металлических частиц, формула (8) дает заниженное значение сопротивления в $d_{\text{нм}}/(\pi\lambda)$ раз. Поэтому, с учетом числовых значений $d_{\text{нм}}$, λ и формулы (11), заключаем, что основной вклад в электрическое сопротивление пленки вносит контактное сопротивление, и формулу (8) следует преобразовать к виду:

$$\rho_{\text{пл}}^3 = \rho_0^3 \left(1 + \frac{l_e}{d_{\text{нм}}}\right) \left(1 + \frac{l_e}{h_{\text{пл}}}\right) \frac{d_{\text{нм}} \sqrt{2m_e W_F}}{\pi h} \quad (14)$$

где $\rho_{\text{пл}}^3$ – удельное электрическое сопротивление пленки, сформированной из проводящих шарообразных наночастиц металла.

Для этой модели расположения наночастиц металла на подложке с учетом квантово-механических явлений и формулы (10), значение $\rho_{\text{мпл}}^3$ записывается в виде

$$\rho_{\text{пл}}^3 = \rho_0^3 \left(1 + \frac{l_e}{d_{\text{нм}}}\right) \times \left[1 + \frac{l_e [\rho_{\text{м}} - a(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ж}})]}{a n_s d_k^3 \rho_{\text{ж}}}\right] \frac{d_{\text{нм}} \sqrt{2m_e W_F}}{\pi h} \quad (15)$$

Поверхностное электрическое сопротивление материала пленки на квадрат по определению есть

$$R_{\text{кв}} = \frac{\rho_{\text{пл}}^3}{h_{\text{пл}}} \quad (16)$$

В качестве примеров на рис. 1–3 приведены результаты численных расчетов по выражениям (10), (15), (16) толщины, удельного электрического сопротивления и удельного поверхностного электрического сопротивления серебряной пленки в зависимости от числа наносупензированных серебром капель рабочей жидкости, наносимых на единицу площади подложки при различных массовых долях наночастиц серебра в капле рабочей жидкости. При этом принимались характерные для серебра значения: $\rho_0^3 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $l_e = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\rho_{\text{м}} = 10490 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $d_{\text{нм}} = 10^{-8} \text{ м}$, $d_k = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $W_F = 5,51 \text{ эВ}$.

С учетом высокой производительности и быстродействия предложенного электрокаплетруйного метода высокого давления формирования проводящих пленок при теоретических оценках параметров электропроводящих пленок рассмотрен довольно широкий диапазон изменения числа капель наносупензированной серебром рабочей жидкости, наносимых на единицу поверхности (до 10^9 капель на м^2). Такое число капель на единицу площади подложки в принципе легко получить при реализации данного электрокаплетруйного метода.

Поскольку формируемая пленка не может быть тоньше диаметра наночастиц серебра, на рис. 1 соответствующие расчетные значения показаны пунктиром. Следовательно, при изменении числа капель на квадрат площади подложки можно получать (в зависимости от массовых долей наночастиц серебра в капле рабочей жидкости) толщину проводящей пленки существенно большей, чем размер наночастиц металла. Расчет проводился для среднего диаметра наночастиц серебра 10 нм. Толщины формируемой электрокаплетруйным методом пленок на подложке находятся в диапазоне толщин проводящих пленок, экспериментально получаемых, например, методом магнетронного распыления и осаждения из паровой фазы [13].

Из рис. 2 следует, что удельное электрическое сопротивление формируемой серебряной пленки с увеличением числа n_s наносупензированных серебром капель, наносимых на единицу площади подложки, уменьшается и стремится к предельному значению. Причем, чем больше массовая доля наночастиц серебра в капле рабочей жидкости, тем при меньших n_s достигается это предельное значение.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление на квадрат формируемой металлической пленки можно получить порядка 10 Ом/кв (рис. 3). Это достигается изменением числа наносимых капель на квадрат площади подложки и массового содержания серебра в рабочей жидкости. Такое поверхностное сопротивление тонких пленок серебра известно из опубликованных экспериментальных данных.

Кроме того, представленные на рис. 3 теоретические результаты для удельного электрического сопротивления серебряной пленки, формируемой электрокаплетруйным методом на подложке, качественно подтверждаются имеющимися в лите-

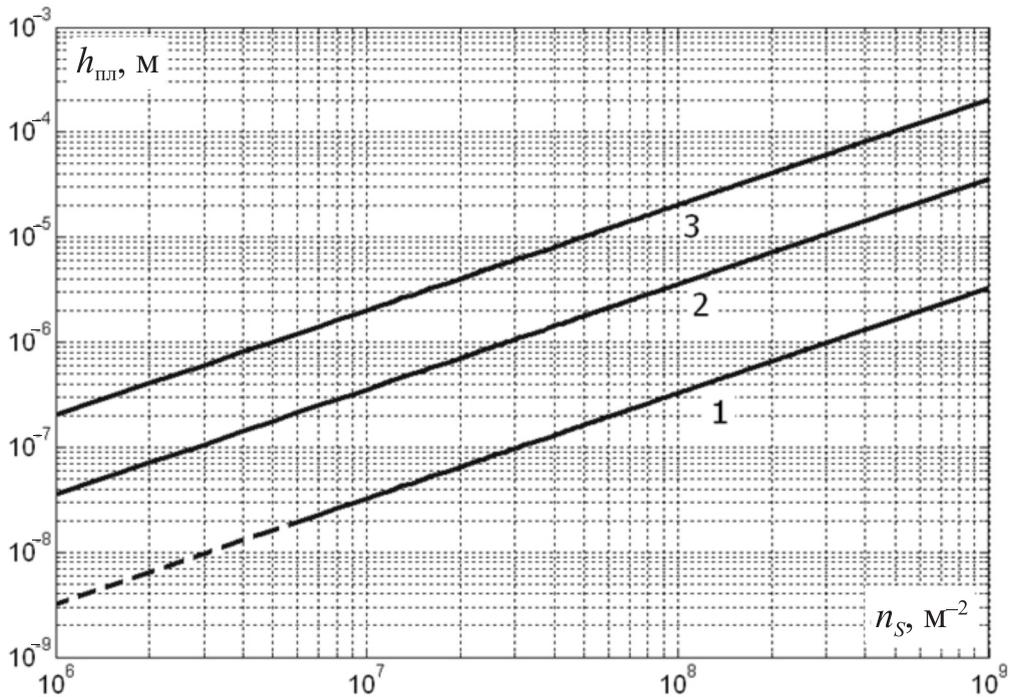


Рис 1. Зависимость толщины серебряной пленки от числа наносuspendированных капель, наносимых на единицу площади, при различных массовых долях наночастиц серебра в капле жидкости: 1 – $a = 0,01$; 2 – $a = 0,1$; 3 – $a = 0,4$

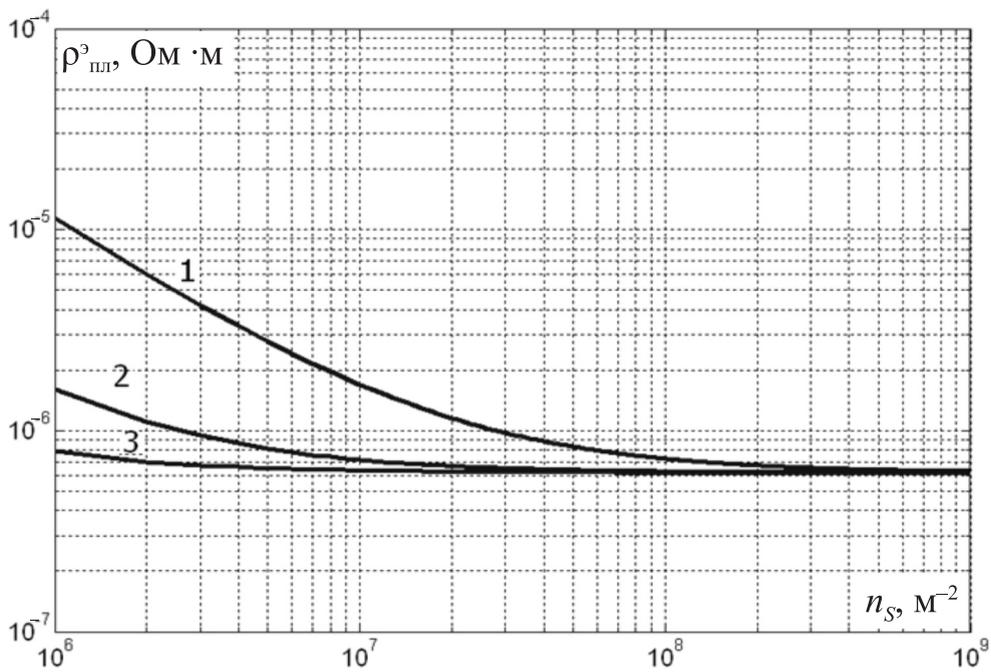


Рис 2. Зависимость удельного сопротивления металлической пленки от числа наносuspendированных капель, наносимых на единицу площади, при различных массовых долях наночастиц металла в капле жидкости: 1 – $a = 0,01$; 2 – $a = 0,1$; 3 – $a = 0,4$

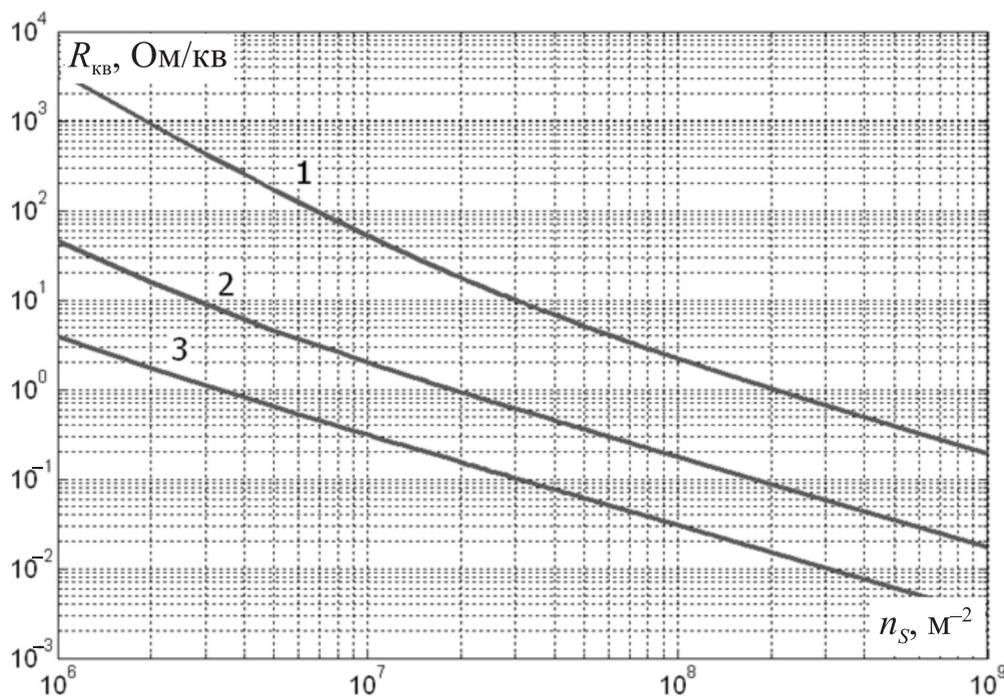


Рис 3. Зависимость удельного поверхностного электрического сопротивления на квадрат металлической пленки от числа наносуспензированных серебром капель рабочей жидкости, наносимых на единицу площади подложки, при различных массовых долях наночастиц серебра в капле рабочей жидкости: 1 – $a = 0,01$; 2 – $a = 0,1$; 3 – $a = 0,4$

ратуре экспериментальными данными [13], правда, полученными магнетронным распылением для тонкой медной пленки с послойным ее осаждением.

В связи с параллельным созданием рабочих жидкостей для предложенного метода, его экспериментальное исследование будет являться предметом дальнейших исследований. Поэтому

приведенные выше теоретические результаты сравнивались с известными данными, полученными экспериментально при формировании проводящих тонких пленок (порядка мкм) другими методами.

Полученные теоретические результаты не противоречат известным данным.

Работа выполнена в соответствии с проектом № 2.1.2/6494 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kim, D.** Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing Bong Kyun Park [Текст]/D. Kim, S. Jeong, J. Moon [et al.]/Thin Solid Films.–2007.–№ 515.–P. 7706–7711.

2. **Grouchko, M.** Formation of air-stable copper-silver core-shell nanoparticles for ink-jet printing [Текст]/M. Grouchko, A. Kamyshniy, Sh. Magdassi//Journal of Materials Chemistry.–2009.–№ 19.–P. 3057–3062.

3. **Woo, K.** Ink-jet printing of Cu-Ag-Based Highly Conductive Tracksona Transparent Substrate [Текст]/K. Woo, D. Kim, J. Kim [et al.]/Langmuir.–2009.–№ 25.–P. 429–433.

4. **Murata, K.** Super-fine ink-jet printing toward

the minimal manufacturing system [Текст]/K. Murata, J. Matsumoto, A. Tezuka, [et al.]/Microsyst Technol.–2005.–№ 12.–P. 2–7.

5. **Лоскутов, А.И.** Фасетирование поверхности наночастиц золота и адсорбция органических макромолекул [Текст]/А.И. Лоскутов, О.Я. Урюпина, В.В. Высоцкий [и др.]/Коллоидный журнал.–2009.–Т. 71.–№ 5.–С. 652–656.

6. **Толстой, В.П.** Синтез нанослоев неорганических соединений по схеме «слой-за слоем» на границе раздела твердое тело-раствор [Текст]/В.П. Толстой//Автореф. дисс....докт. хим. наук.–2009.–СПбГУ.–33 с.

7. **Лоскутов, А.И.** Исследование процессов формирования металлополимерных слоев на осно-

ве поливинилпирролидона и наночастиц серебра [Текст]/А.И. Лоскутов, В.И. Ролдугин, О.Я. Урюпина// Нанотехника.–2007.–№ 4.–С. 57–62.

8. **Sanchez-Romaguera, V.** Ink-jet printing of 3D metal- insulator- metal crossovers [Текст]/V. Sanchez-Romaguera, M. Madec, S. Yeates//Reactive@Functional Polymers.–2008.–№ 68.–Р. 1052–1058.

9. **Kaydanova, T.** Ink-jet printing Approaches to Solar Cell Contacts [Текст]/T. Kaydanova, A. Miedaner, C. Curtis [et al.]//Presented at the National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting Denver.–Colorado, March 24-26 2003.–4 p.

10. **Mette, A.** Metal Aerosol Jet Printing for Solar Cell Metallization [Текст]/A. Mette, P.L. Richter, M. Horteis//Prog. Photovolt: Res. Appl.–2007.–№ 15.–Р. 621–627

11. **Нагорный, В.С.** Базовые рецептуры наноструктурированных серебром рабочих жидкостей для

электрокаплеструйных технологий [Текст]/В.С. Нагорный//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика, телекоммуникации, управление.–2009.–№ 5 (86).–С.179–184.

12. **Пасынков, В.В.** Материалы электронной техники [Текст]/В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. –М.: Высш. шк., 1986.–367 с.

13. **Быков, Ю.А.** О некоторых особенностях структуры и свойств металлических тонких пленок [Текст]/Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин, Е.И. Газукина//Металловедение и термическая обработка металлов.–2000.–№ 6.–С. 45–47.

14. **Антонец, И.В.** Особенности наноструктуры и удельной проводимости тонких пленок различных металлов [Текст]/И.В. Антонец, Л.И. Котов, С.В. Некипелов [и др.]//Журнал технической физики.–2004.–Т. 74.–Вып. 3.–С. 24–27.

УДК 623.1

А.Н. Козлов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ШТЫРЯ ОТКРЫТОГО ШТЕПСЕЛЬНОГО РАЗЪЕМА

Известно, что импульсы мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения способны выводить из строя элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в первую очередь, полупроводниковые [1]. СВЧ излучение может проникать в РЭА через отверстия, стыки и неоднородности корпусов, а также через открытые разъемы отрывных кабельных линий. Проникновение СВЧ излучения через разъемы и кабельные соединения сильно зависит от их конструктивных особенностей. Открытые штепсельные разъемы (ОШР) имеют существенные отличия от отверстий (наличие штырей, кабеля и т. д.). При воздействии СВЧ излучения на открытые штепсельные разъемы часть мощности СВЧ излучения отражается от них, часть проникает внутрь экранированного корпуса РЭА, а часть расходуется на наведение в штырях разъемов ЭДС. С точки зрения оценки деградационного воздействия СВЧ излучения на РЭА представляют интерес два последних эффекта. Радиоэлементы РЭА подвергаются воздействию проникшего через разъем СВЧ излучения, и воздействию наведенной в штырях разъема

ЭДС. Известны результаты [2, 3] экспериментального исследования проникновения СВЧ излучения с длиной волны 3,2 см в экранированный объем через некоторые ОШР, используемые в авиационной и ракетной технике. Установлено [2, 3], что величина наведенной в штыре ЭДС существенно зависит от угла падения излучения на штырь разъема, т. е. штырь имеет диаграмму направленности (ДН). Причем, конфигурация ДН зависит от местоположения штыря в разъеме.

Для оценки деградационного воздействия СВЧ излучения на элементы РЭА, имеющие электрическую связь с ОШР, необходима математическая модель, позволяющая рассчитать диаграмму направленности штыря ОШР и величину ЭДС, наведенную в нем. Теоретическая оценка величин ЭДС, наводимых в штырях ОШР, может быть произведена на основе положений теории антенных решеток. В этом случае штыри ОШР рассматриваются как элементы плоскостной антенной решетки, состоящей из несимметричных вибраторов.

Математическая модель

Приняв антенный механизм взаимодействия СВЧ излучения со штырями разъема [4], штыри ОШР (рис.1) можно рассматривать как элементарные антенны. ЭДС ε_m , наводимая в штыре ОШР, который представляет собой несимметричный вибратор, определяется известным выражением [5]:

$$\varepsilon_m = E_m l_{\phi} F_n(\Theta) |\xi|, \quad (1)$$

где E_m – амплитуда напряженности электрического поля падающего СВЧ излучения в месте расположения ОШР, В/м; l_{ϕ} – действующая длина штыря (антенны), м; $F_n(\Theta)$ – нормированная диаграмма направленности штыря в направлении прихода излучения; $|\xi|$ – поляризационный коэффициент.

Выражение (1) применимо для одиночного штыря в свободном пространстве. В рассматриваемом случае имеет место система штырей ОШР (элементарных антенн), поэтому необходимо учесть влияние соседних штырей. Очевидно,

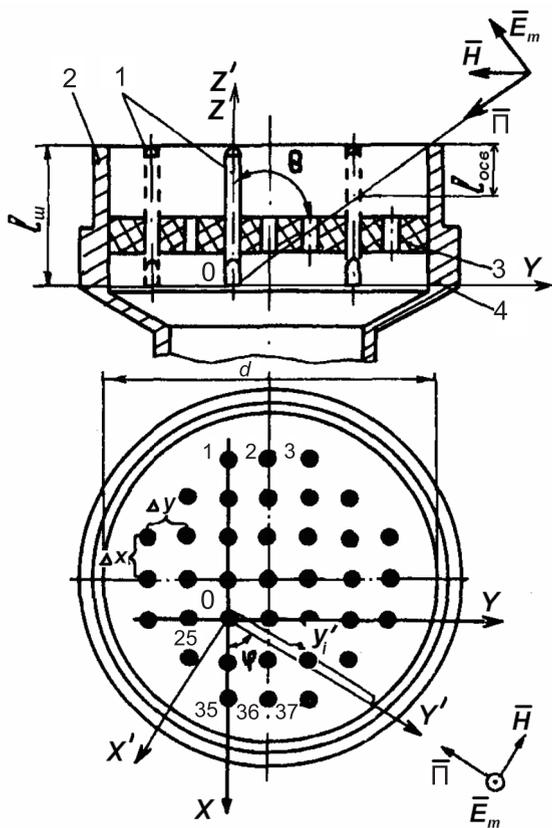


Рис.1. Открытый штепсельный разъем: 1 – штырь; 2 – ботик; 3 – диэлектрический держатель; 4 – корпус

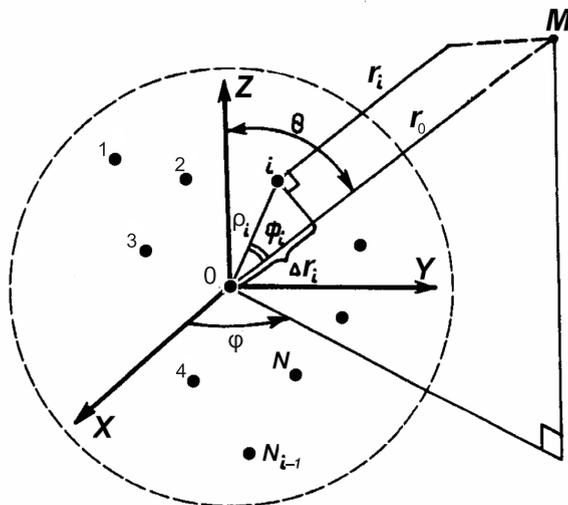


Рис. 2. Система одиночных излучателей

что диаграмма направленности (ДН) одиночного штыря будет искажена, и, следовательно, в выражении (1) необходимо использовать нормированную ДН системы штырей, т. е. ДН с учетом взаимного влияния всех штырей ОШР. Следует отметить, что при известных величинах E_m , l_{ϕ} и $|\xi|$ погрешность расчета величины наведенной ЭДС по формуле (1) будет определяться ошибкой в определении значения нормированной диаграммы направленности $F_n(\Theta)$.

Согласно принципу взаимности, применяемому для расчета приемных антенн, будем считать, что ДН системы в режиме приема идентична диаграмме направленности этой же системы в режиме передачи [3, 4]. На рис. 2 изображена плоскостная система из N одиночных излучателей, которыми являются штыри ОШР.

Поле излучения в точке M, расположенной в дальней зоне, будет равно векторной сумме полей излучения штырей (излучателей):

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^N \dot{E}_i. \quad (2)$$

Система состоит из идентичных и одинаково ориентированных в пространстве штырей ОШР; амплитуда тока (поля) в них одинакова. Тогда для дальней зоны комплексная амплитуда электрического поля i-го штыря системы в векторной форме имеет вид:

$$\dot{E}_i = j \frac{30kA}{r_o} e^{-jk r_o} \sum_{\alpha=1}^N I_{\alpha} F_i(\Theta) e^{j\varphi_{\alpha}} e^{jk \Delta r_i}, \quad (3)$$

где A – амплитуда тока (поля) в штырях, А; φ_i – фаза тока (поля) в штырях; $F_i(\Theta)$ – диаграмма на-

правленности i -го штыря; r_i , Θ , φ – сферические координаты точки M для i -го штыря (рис. 2); r_o – расстояние от центра системы координат до точки M ; Δr_i – разность хода лучей для i -го штыря относительно центра системы координат; l_{oi} – действующая длина i -го штыря; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, где λ – длина волны излучения.

Сумма в выражении (3) характеризует направленные свойства системы и по существу является ДН системы штырей ОШР, выражение для которой имеет следующий вид:

$$F_c(\Theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N l_{oi} F_i(\Theta) e^{j\theta_i} e^{jk\Delta r_i}. \quad (4)$$

Фаза поля φ_i в месте расположения i -го штыря с учетом разности хода лучей определяется выражением:

$$\psi_i = \psi_0 + x_i k \sin \Theta \cos \varphi + y_i k \sin \Theta \sin \varphi, \quad (5)$$

где x_i и y_i – координаты i -го штыря, м; ψ_0 – начальная фаза поля, равная фазе поля в месте расположения центра системы координат.

Разность хода лучей Δr_i для i -го штыря в зависимости от углов Θ и φ рассчитывается по формуле:

$$\Delta r_i = x_i k \sin \Theta \cos \varphi + y_i k \sin \Theta \sin \varphi. \quad (6)$$

Выражение для диаграммы направленности i -го штыря ОШР имеет вид:

$$F_i(\Theta) = \frac{\cos(kl_{wi} \cos \Theta) - \cos(kl_{wi})}{\sin(\Theta)}, \quad (7)$$

где l_{wi} – длина i -го штыря.

Действующая длина штыря определяется выражением:

$$l_{oi} = \left(\frac{1}{k} \right) \text{tg}(0,5kl_{wi}). \quad (8)$$

Для короткого штыря, когда выполняется условие $l_{wi}/\lambda \leq 0,1$ можно принять $l_{oi} = 0,5l_{wi}$.

Большинство ОШР имеют защитный бортик (см. рис. 1), поэтому в зависимости от угла падения СВЧ излучения Θ некоторые штыри будут «освещены» излучением полностью, а некоторые – частично. Зная геометрические размеры ОШР, определить длину «освещенного» участка $l_{осв}$ можно путем несложных геометрических вычислений. Для разъема, изображенного на рис. 1, длина «освещенного» участка i -го штыря рассчитывается по формуле:

$$l_{освi} = \frac{y'_i}{\text{tg}(\Theta)}, \quad (9)$$

где y'_i – расстояние от i -го штыря до бортика ОШР в направлении прихода излучения.

Условие «полной освещенности» штыря можно записать в следующем виде:

$$y'_i \geq l_{wi} \text{tg}(\Theta). \quad (10)$$

При выполнении условия (10) величина l_{wi} в выражениях (7) и (8) равна длине штыря ОШР. В противном случае – длине освещенного участка штыря, вычисленной по формуле (9).

Нормированная диаграмма направленности системы штырей ОШР определяется выражением:

$$F_n(\Theta, \varphi) = \frac{F_c(\Theta, \varphi)}{F_{c\max}(\Theta_{\max}, \varphi_{\max})}, \quad (11)$$

где $F_{c\max}(\Theta_{\max}, \varphi_{\max})$ – максимальное значение диаграммы направленности системы штырей ОШР; Θ_{\max} , φ_{\max} – углы, при которых значение ненормированной диаграммы направленности максимально.

При определении диаграммы направленности системы излучателей в теории антенных решеток центр системы координат помещается в геометрический центр системы излучателей. В рассматриваемом случае центр системы координат помещался в место расположения выбранного для исследования штыря ОШР. В этом случае можно считать, что выражения (4) и (11) будут определять ДН выбранного штыря с учетом влияния всех остальных штырей ОШР.

Методика расчета диаграммы направленности штырей

При разработке методики приняты следующие допущения: диффракция на краю бортика ОШР не учитывается (т. е. используется метод геометрической оптики, т. к. размеры разъемов соизмеримы с длиной волны излучения СВЧ диапазона); поглощение, преломление и отражение от диэлектрического держателя штырей и внутренних стенок ОШР не учитываются. Принятые допущения приведут к некоторому занижению значения наведенной ЭДС.

Для расчета величин ЭДС, наводимых в штырях ОШР, необходимы следующие исходные данные: параметры СВЧ излучения (длина волны излучения, величина напряженности электрического поля в месте размещения ОШР, углы, задающие направление прихода излучения, и поляризационный коэффициент); геометрические размеры разъема (диаметр ОШР, высота его бор-

тика, количество, длина, расположение штырей в ОШР).

Методика расчета величин ЭДС, наводимых в штырях ОШР, содержит следующие основные пункты.

1. В месте расположения выбранного для исследования штыря (например, штыря, имеющего электрическую связь с радиоэлементом(ми) РЭА), размещается центр системы координат $OXYZ$ (см. рис. 1) и определяются координаты x_i и y_i каждого штыря ОШР.

2. Определяется величина $l_{ши}$ каждого штыря с учетом его «освещенности», для чего:

строится «местная» система координат $OX'Y'Z'$ для каждого штыря, ось OY' которой совпадает с направлением воздействия излучения, а центр находится в месте расположения данного штыря;

определяется расстояние y'_i ;

проверяется условие «полной освещенности» (10) каждого штыря. При выполнении этого условия величина $l_{ши}$ равна длине штыря, в противном случае величина $l_{ши}$ равна длине «освещенной» части штыря, которая определяется по формуле (9).

3. Вычисляется действующая длина каждого штыря по формуле (8).

4. Определяется значение нормированной ДН исследуемого штыря $F_i(\Theta, \varphi)$ для заданных углов Θ и φ , для чего:

вычисляются значения ДН системы по формуле (4) при различных значениях Θ (от 0 до 90°) и φ (от 0 до 180°) и определяется ее максимальное значение $F_{сmax}(\Theta_{сmax}, \varphi_{сmax})$;

определяется значение нормированной ДН исследуемого штыря для заданных значений Θ и φ по формуле (11).

5. Рассчитывается амплитуда ЭДС, наведенная в выбранном штыре по формуле (1), где $F_{н}(\Theta)$ – значение нормированной ДН штыря ОШР, вычисленное в п. 4.

При необходимости расчеты по пунктам 1–5 производятся для следующего штыря, пока все штыри ОШР не будут исследованы.

Результаты расчетов и сопоставление их с экспериментальными данными

При расчетах диаграммы направленности ОШР использовались следующие исходные данные: параметры СВЧ излучения ($\lambda = 3,2$ см; $E_m = 10...100$ кВ/см, угол $\Theta = 0...90^\circ$, угол

$\varphi = 0...360^\circ$ и $|\xi| = 0,5$); параметры ОШР (диаметр ОШР $d = 24$ мм, $N = 50$, $l_{ши} = 12$ мм) и др. (см. рис. 3, где размеры разъема и расположение штырей изображены в масштабе 1:1).

Расчеты показали, что диаграмма направленности имеет сложную многолепестковую конфигурацию, которая определяется местом расположения штыря в разъеме, т. е. каждому штырю соответствует своя диаграмма направленности. Главный максимум ДН находится со стороны большего количества соседних штырей по отношению к исследуемому. На рис. 3 штриховыми линиями изображены рассчитанные сечения нормированной диаграммы направленности одного из штырей ОШР, используемого в авиационной технике, сплошными линиями изображены сечения экспериментальной диаграммы направленности [2, 3] для этого же штыря. Сопоставление экспериментальных результатов с расчетными показало, что главный максимум экспериментальной ДН находится под более острым углом Θ к оси разъема, чем теоретический. Также наблюдается отклонение главного максимума по углу φ . Лепестки экспериментальных ДН более узкие. Это, по всей видимости, обусловлено влиянием кабеля, подсоединенного к ОШР, т. к. при теоретическом расчете он не учитывался.

Был проведен расчет нормированных диаграмм направленности для других разъемов, экспериментальные результаты для которых представлены в [2]. Анализ и статистическая обработка погрешностей теоретического определения значений нормированной ДН штырей исследуемых разъемов позволяет сделать вывод, что распределение погрешности по углу Θ можно считать нормальным с математическим ожиданием $-11,25^\circ$, а по углу φ целесообразно принять равномерным в интервале $-23...+25^\circ$. Эти величины можно использовать в качестве поправки при теоретическом расчете ДН штырей, «сдвигая» главный максимум ДН.

Предложена математическая модель и методика расчета диаграммы направленности штыря разъема, которые можно использовать для оценки деградационного воздействия СВЧ излучения на экранированную РЭА через ОШР. Проведено сравнение результатов расчета с известными экспериментальными данными и проанализирована погрешность расчетов. Данную модель, по мне-

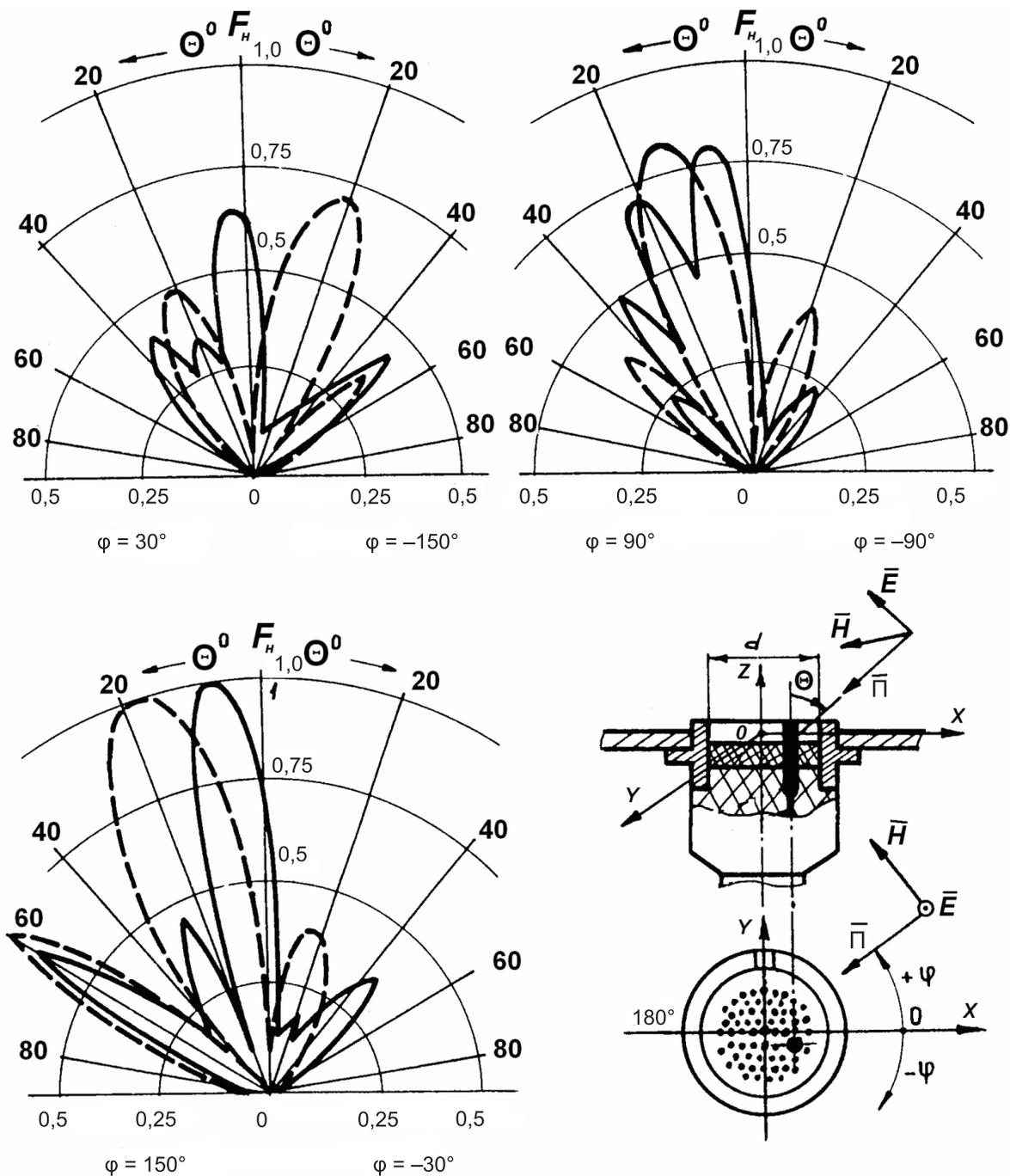


Рис. 3. Сечение ДН одного из штырей штепсельного разъема
 (—) эксперимент; (---) теоретический расчет

нию автора, можно использовать для длин волн СВЧ излучения менее 5 см и мощности излучения не превышающей границу СВЧ пробоя среды, где размещается РЭА с ОШР.

Таким образом, применяя положения теории антенных решеток, можно проводить моделиро-

вание диаграммы направленности штырей ОШР. Исследовав все штыри ОШР, можно определить те из них, ДН которых будет иметь самые узкие лепестки. При невозможности закрыть разъем экраном, к этим штырям следует подсоединять наиболее чувствительные цепи РЭА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Панов, В.В.** Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения [Текст]/В.В. Панов, А.П. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника.–1995.–№ 10, 11, 12.–С. 15–19.
2. **Козлов, А.Н.** Экспериментальное исследование проникновения СВЧ излучения в экранированные объемы через открытые штепсельные разъемы [Текст]/А.Н. Козлов, Н.Н. Корогаев, Б.В. Илькевич [и др.]// Вестник Пермск. гос. ун-та. Сер. Физика. –1996. –Вып. 6. –С. 125–132.
3. **Kozlov, A.** Penetration of microwaves into nonuniformly screened spaces [Текст]/А. Kozlov, A. Rybacov, V. Pashkevich //Latvian journal of physics and technical sciences. –2000.–№ 4.–С. 31–38.
4. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток [Текст]/Под ред. Д.И. Воскресенского.–М.: Радио и связь, 1989.–465 с.
5. **Сазонов, Д.М.** Антенны и устройства СВЧ [Текст]/Д.М. Сазонов. –М.: Высш. шк., 1988.–432 с.

УДК 004.272.2

А.Г. Басыров

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Энергопотребление вычислительных систем (ВС) – важный фактор, определяющий выбор аппаратно-программной платформы для решения требуемых задач.

Ведущие производители вычислительной техники активно работают над решением проблемы энергоэффективности. Эффективное энергопотребление продукции – одно из ее главных конкурентных преимуществ. Производители компьютерного оборудования увеличивают инвестиции в энергосберегающие технологии, понимая, что пользователей интересует производительность, отнесенная к энергозатратам.

Известно, например, что в расходах на эксплуатацию центров обработки данных доля затрат на электроэнергию составляет около 40 %. Еще актуальнее проблема энергоэффективности в специализированных вычислительных системах, функционирующих в условиях ограниченного энергопотребления. От таких систем, выполняющих задачи в реальном времени, требуются высокие показатели производительности и надежности при существенных ограничениях на потребляемый энергоресурс автономных источников питания.

Современные технологии энергосбережения (программно-аппаратные средства управления пи-

танием, виртуализация серверов, Blade-системы, системы кондиционирования и охлаждения), применяемые в высокопроизводительных вычислительных системах, в основном направлены на *обеспечение* функционирования вычислительных систем, слабо затрагивая *организацию* самих вычислений. Вместе с тем, при оптимизации вычислительных процессов, как правило, удается значительно сократить энергопотребление вычислительных систем.

Концепция энергосберегающих вычислительных процессов

Основным подходом к удовлетворению высоких требований по производительности и надежности современных ВС является внедрение методов параллельной обработки информации [1]. Будем считать, что в постановке рассматриваемой проблемы на показатели надежности и производительности функционирования ВС накладываются соответствующие ограничения, а целевой функцией является энергоемкость ВС, которую необходимо минимизировать.

Энергоемкость вычислительного процесса в общем виде можно определить как

$$E = T \cdot M \cdot S,$$

где T – время (длительность) вычислительного

процесса; M – количество вычислительных модулей (ВМ), реализующих вычислительный процесс; S – потребляемая мощность каждого ВМ.

Отсюда следует, что управление вычислительными процессами с целью энергосбережения ВС возможно, путем воздействия на эти составляющие потребляемой энергии.

Рассмотрим уровни применения энергосберегающих технологий при организации вычислительных процессов в специализированных вычислительных системах и факторы, влияющие на энергоэффективность ВС (рис. 1). Будем полагать, что в таких системах жестко определены требования по надежности и производительности

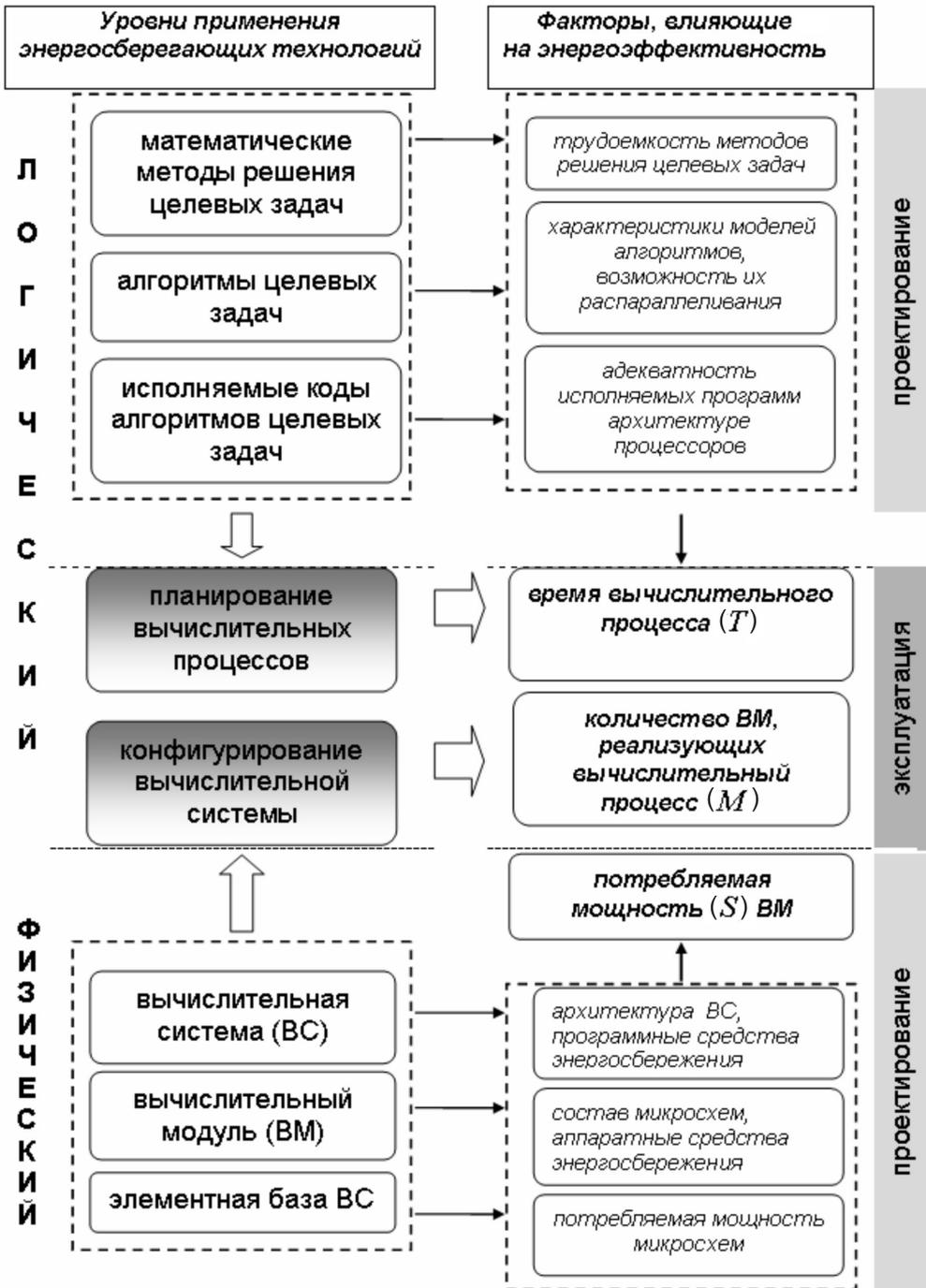


Рис. 1. Концепция энергосберегающих вычислительных процессов

вычислительных процессов, а также априори известен круг решаемых задач.

Управление энергопотреблением рассматривается на логическом и физическом (аппаратном) уровне. Хронологически это управление разнесено на этапы проектирования и эксплуатации ВС.

Логический уровень организации вычислительных процессов формирует модель вычислений и включает:

выбор или проектирование ВС, разработку математического и программного обеспечения (этап проектирования);

конфигурирование ВС и планирование параллельной обработки информации (этап эксплуатации).

Физический уровень подразумевает реализацию вычислительного процесса, в ходе которого происходит расход энергоресурса.

Взаимосвязь логического и физического уровней показана на рис. 2.

Концептуально снижение энергопотребления ВС достигается при организации вычислительных процессов за счет сокращения общего времени работы вычислительных модулей путем:

выбора на этапе проектирования ВС алгоритмов решения целевых задач и архитектур ВС, обеспечивающих максимальную загрузку вычислительных модулей;

конфигурирования ВС и планирования параллельных вычислительных процессов (ПВП) при решении заданных целевых задач в заданных ограничениях на этапе эксплуатации ВС.

Значительный потенциал повышения оперативности вычислительных процессов, а, следовательно, и энергосбережения ВС, кроется в математических методах и алгоритмах решения целевых задач. Выбор методов решения целевых задач определяется, с одной стороны, требовани-

ями к результатам вычислений, а с другой, трудоемкостью вычислительных операций.

Алгоритм решения целевой задачи в параллельных ВС по возможности должен быть адаптивным к различным конфигурациям ВС, т. е. обеспечивать соответствующее ускорение вычислений при различном количестве используемых вычислительных модулей.

Непосредственным потребителем энергоресурса является ВС, которая должна выполнять целевые задачи с требуемой производительностью и надежностью, обеспечивая при этом максимальную энергоэффективность. На этапе проектирования ВС выбирается или синтезируется ее архитектура, которая:

способна выполнить комплекс целевых задач при максимальной рабочей нагрузке;

содержит в своем составе вычислительные модули, с минимально возможной для данного применения потребляемой мощностью;

позволяет управлять режимами энергопотребления аппаратных средств.

Выбор того или иного метода и алгоритма решения целевой задачи, а также архитектуры ВС выполняется на основе моделирования вычислительных процессов на этапе ее проектирования. Моделирование вычислительных процессов включает:

моделирование алгоритмов целевых задач;

требований к показателям качества функционирования БВС;

потока заявок на выполнение целевых задач;

потока отказов ВМ БВС,

моделирование процессов конфигурирования БВС и планирования параллельных вычислений.

В результате моделирования из множества

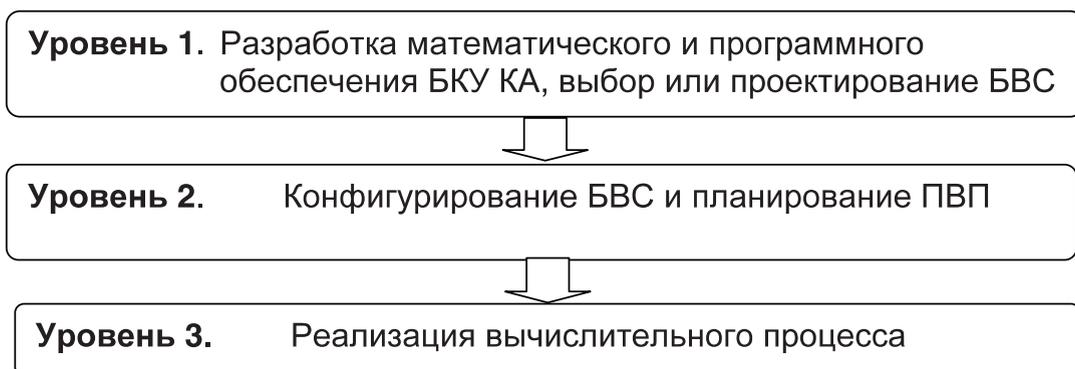


Рис. 2. Взаимосвязь уровней организации энергосберегающих вычислительных процессов

возможных алгоритмов решения каждой целевой задачи и вариантов архитектур ВС должны быть выбраны алгоритмы задач и архитектура ВС, обеспечивающие максимальную вероятность того, что энергопотребление ВС не превысит заданное значение при выполнении ограничений на производительность и надежность функционирования ВС.

На этапе эксплуатации ВС для известных моделей алгоритмов целевых задач и модели ВС при поступлении заявок на решение целевых задач необходимо:

определить оптимальную по энергопотреблению конфигурацию ВС, способную выполнить требуемые целевые задачи к заданным директивным срокам с требуемой надежностью;

спланировать вычислительный процесс для заданной конфигурации ВС и реализовать его.

Под конфигурацией понимается подмножество вычислительных модулей, входящих в состав ВС, выделяемых для решения целевой задачи. Конфигурация состоит из некоторого количества основных и резервных вычислительных модулей. Выбор оптимальной конфигурации ВС основан на синтезе планов (расписаний) параллельного вычислительного процесса [2] для каждой допустимой конфигурации и оценивание этих расписаний по времени реализации ПВП. Конфигурация, обеспечивающая выполнение целевых задач с минимальным энергопотреблением и номинальным качеством и соответствующий ей план ПВП берутся за основу для реализации вычислительного процесса.

Рассмотренный двухэтапный подход (проектирование и эксплуатация ВС) к решению проблемы снижения энергопотребления определил концеп-

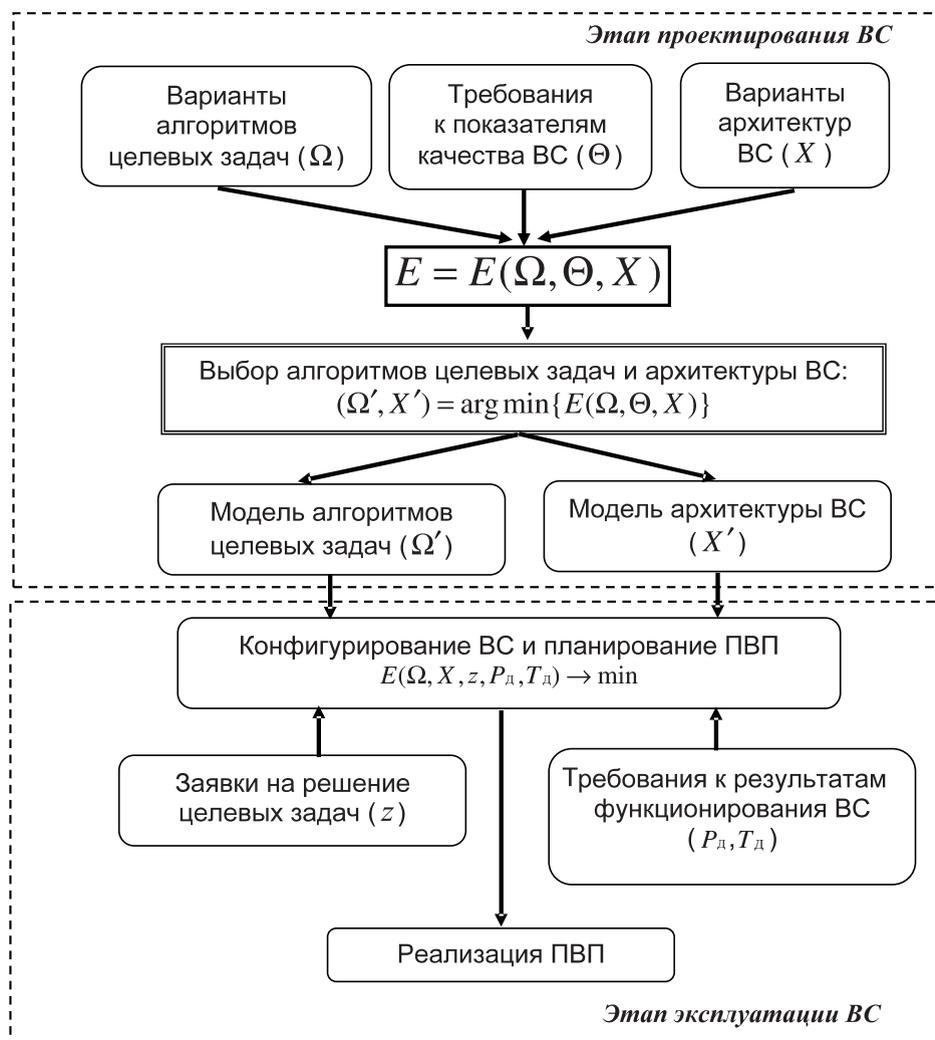


Рис. 3. Концептуальная модель энергосберегающих вычислительных процессов

туальную модель энергосберегающих вычислительных процессов, представленную на рис. 3.

Обозначения, используемые на рисунке: E – энергия, потребляемая БВС; X – множество вариантов архитектур ВС; Ω – множество вариантов алгоритмов целевых задач; Θ – множество требований к показателям качества ВС; X' – применяемая архитектура ВС; Ω' – используемые алгоритмы целевых задач; P_d – директивная вероятность безотказной работы ВС на заданном интервале функционирования ВС; T_d – директивная производительность ВС на заданном интервале функционирования ВС.

Исходя из приведенных рассуждений, основными задачами организации энергосберегающих вычислительных процессов в бортовых вычислительных системах являются:

1) на этапе проектирования ВС – разработка алгоритмов целевых задач, эффективно решаемых на заданных структурах ВС, и выбор или разработка структур ВС, адекватных алгоритмам и программам целевых задач. Энергозатраты ВС в дальнейшем при реализации вычислений будут определяться показателями времени выполнения программ целевых задач и потребляемой мощностью ВС;

2) на этапе эксплуатации ВС – определение конфигурации ВС для энергосберегающего решения целевых задач на основе планирования параллельной обработки информации и оценивания времени вычислительных процессов. Энергозатраты ВС будут определяться количеством вычислительных модулей, выделенных на решение целевых задач, и временем выполнения программ целевых задач в соответствии с конфигурацией БВС и расписанием ПВП.

Анализ применения высокопроизводительных ВС показал, что кроме достижения экономического эффекта, связанного с высокими ценами на электроэнергию, при решении проблемы энергоэффективности ВС удастся решить и смежные технические задачи. Например, повысить надежность функционирования аппаратных средств за счет меньшего тепловыделения, упростить систему охлаждения и кондиционирования и др.

Реализация рассмотренной концепции кроме высоких показателей производительности и надежности, присущих параллельным вычислительным системам, позволит также обеспечить и энергоэффективность при их функционировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления. [Текст]/В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин.–СПб.: БХВ-Петербург, 2004.–608 с.

2. **Барский, А.Б.** Параллельные информационные технологии: учеб. пособ. [Текст]/А.Б. Барский.–М.: Интернет-Университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.–503 с.

УДК 519.1

И.Х. Утакаева, А.А.Кочкаров

К ВОПРОСУ ОБ АЛГОРИТМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА

Способность «распознавать» считается основным свойством человеческих существ, как, впрочем, и других живых организмов. Образ представляет собой описание объекта. В каждое мгновение нашего бодрствования совершаются акты распознавания. Мы опознаем окружающие нас объекты и в соответствии с этим перемещаем-

ся и совершаем определенные действия: можем заметить в толпе друга и узнать голос знакомого, прочесть рукопись и идентифицировать отпечатки пальцев, отличить улыбку от злобной гримасы. Человеческое существо представляет собой очень сложную информационную систему – в некоторой степени это определяется чрезвычайно

развитыми у человека способностями распознавать образы [1].

В последние годы распознавание образов находит все большее применение в повседневной жизни. Распознавание речи и рукописного текста значительно упрощает взаимодействие человека с компьютером, распознавание печатного текста используется для перевода документов в электронную форму.

Математической моделью многих задач распознавания является задача распознавания предфрактального графа [2].

Термином «затравка» условимся называть какой-либо связный n -вершинный граф $H = (W, Q)$, с непомеченными, т. е. нумерованными вершинами $u \in W$. В качестве обобщения известной операции «расщепления вершины», определим операцию «замещения вершины затравкой» (ЗВЗ). Суть операции ЗВЗ состоит в замещении на каждом шаге каждой вершины $v_k (k = 1..n) \in V$ графа $G = (V, E)$ n -вершинной затравкой H , при этом для каждого ребра, инцидентного с v_k , указанная вершина заменяется на некоторую вершину u из W .

Определим поэтапный процесс выполнения ЗВЗ. На этапе $s = 1$ в данной затравке $H = (W, Q)$ нумеруем вершины и ребра; полученный граф обозначим через $G_1 = (V_1, E_1)$.

Пусть выполнены этапы $s = 1, 2, \dots, l$, и по завершению этапа l получен граф $G_l = (V_l, E_l)$, который назовем *предфрактальным* (если $l \rightarrow \infty$, то речь пойдет о фрактальном графе).

В дальнейшем будем использовать некоторые необходимые признаки предфрактальности графа $G = (V, E)$:

для мощности множества вершин $|V| = N$ существует непустое множество пар n, L таких, что $N = N(n, L)$;

для мощности множества ребер $|E|$ существует хотя бы одна пара n, L , удовлетворяющая равенству $|E_L| = q(n, L)$;

множество ребер ранга L состоит из объединения множеств ребер затравок, появившихся в результате того, что каждая вершина ранга $L - 1$ графа была замещена затравкой.

Пусть представлен в явном виде некоторый граф, обладающий признаками предфрактального графа. Задача распознавания предфрактального графа заключается в ответе на вопросы:

1) является ли данный граф предфрактальным с определенной затравкой;

2) можно ли построить эффективный алгоритм, который гарантированно построит процесс порождения предфрактального графа с определенной затравкой.

В данной статье исследуется следующая задача.

Рассмотрим некоторый граф $G = (V, E)$ обладающий необходимыми признаками предфрактального графа:

• для мощности множества вершин $|V| = N$ существуют n, m, L такие, что

$$|V_L| = \begin{cases} m^{\frac{L+1}{2}} n^{\frac{L-1}{2}}, & \text{при } L - \text{нечетном}, \\ m^{\frac{L}{2}} n^{\frac{L}{2}}, & \text{при } L - \text{четном}; \end{cases}$$

• для мощности множества ребер $|E|$ существуют n, m, L , удовлетворяющие равенству:

$$|E_L| = \begin{cases} \frac{m(m-1)}{2} + \sum_{k=0}^{\frac{L-3}{2}} \left[\frac{n(n-1)}{2} m^{k+1} n^k + \frac{m(m-1)}{2} m^{k+1} n^{k+1} \right], & \text{при } L - \text{нечетном}, \\ \sum_{k=0}^{\frac{L-2}{2}} \left[\frac{m(m-1)}{2} m^k n^k + \frac{n(n-1)}{2} m^{k+1} n^k \right], & \text{при } L - \text{четном}; \end{cases}$$

• множество вершин состоит из двух подмножеств V_1 и V_2 , где $V_1(V_2)$ – множество вершин $v \in V$ степени $\text{deg}v = n + 1$ (степени $\text{deg}v = n$).

Согласно полученным результатам проверки необходимых условий данный граф удовлетворяет условиям предфрактальности. Теперь рассмотрим вопрос, является ли представленный граф $G = (V, E)$ предфрактальным графом $G_l = (V_l, E_l)$ с двумя полными затравками $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$, где мощности множеств вершин $|W_1| = m$ и $|W_2| = n$, в случае, когда смежность старых ребер не нарушается. Причем, процедура ЗВЗ произведена на нечетных этапах затравкой $H_1 = (W_1, Q_1)$, и $H_2 = (W_2, Q_2)$ на четных, т. е. ответим на вопросы 1 и 2.

Для распознавания исследованного на необходимые условия предфрактальности графа $G = (V, E)$ предложен алгоритм α .

Алгоритм α

Процедура выделения затравки $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$ обозначается $\gamma_1(\gamma_2)$ в случае, если длина траектории $G = (V, E)$ L – нечетная (четная), то на последнем шаге было замещение затравкой $H_1 = (W_1, Q_1)$ ($H_2 = (W_2, Q_2)$). Следовательно, для

предфрактального графа нечетного ранга L следует воспользоваться процедурой γ_1 , в противном случае – процедурой γ_2 . На последующих этапах процедуры будут чередоваться.

Описание процедуры γ_1 (выделение затравки $H_1 = (W_1, Q_1)$). Во множестве V выделяется очередная неотмеченная вершина v . Так как всякая «новая» затравка $H_1 = (W_1, Q_1)$ имеет $m - 1$ вершину степени $m - 1$ и одну вершину, степень которой больше, чем $m - 1$, то $\forall v \in V$ возможны два случая:

1. $\deg v = m - 1$; 2. $\deg v > m - 1$.

В первом случае исходная вершина и смежные с ней $m - 1$ вершин объединяют во множество W_1 . Далее окрашиваются все вершины W_1 , а также $\frac{m(m-1)}{2}$ ребер, концы которых представляют собой вершины W_1 .

Во втором случае рассматриваемая вершина v имеет инцидентность не только с $(m - 1)$ «новым» ребром, но и со «старыми» ребрами. Среди множества вершин смежных с v выделяются $m - 1$ вершин, степень которых $m - 1$. Исходная вершина v и выделенные $m - 1$ вершин степени $m - 1$ объединяются во множество W_1 . После чего окрашиваются вершины W_1 , а также $\frac{m(m-1)}{2}$ ребер, концы которых представляют собой вершины множества W_1 .

Работа процедуры γ_1 завершается проверкой: образует ли множество выделенных таким образом вершин и ребер m -вершинный полный граф. Если да, то шаг, включающий в себя описанную процедуру γ_1 , завершается результативно, и следует переход к следующему шагу первого этапа. В противном случае, шаг считается безрезультатным, и алгоритм прекращает свою работу с отрицательным ответом на поставленный вопрос распознавания: является ли представленный граф $G = (V, E)$ предфрактальным графом $G = (V, E)$ с двумя полными затравками $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$, где мощности множеств вершин $|W_1| = m$ и $|W_2| = n$, в случае, когда смежность старых ребер не нарушается, где процедура ЗВЗ произведена на нечетных номерах этапов затравкой $H_1 = (W_1, Q_1)$ и затравкой $H_2 = (W_2, Q_2)$ на четных.

Описание процедуры γ_2 (выделение затравки $H_2 = (W_2, Q_2)$). Во множестве V выделяется оче-

редная неотмеченная вершина v . Так как всякая «новая» затравка $H_2 = (W_2, Q_2)$ имеет $n - 1$ вершину степени $n - 1$ и одну вершину, степень которой больше $n - 1$, то $\forall v \in V$ возможны два случая:

1. $\deg v = n - 1$; 2. $\deg v > n - 1$.

В первом случае исходная вершина и смежные с ней $n - 1$ вершин объединяются во множество W_2 . Далее окрашиваются вершины W_2 , а также $\frac{n(n-1)}{2}$ ребер, концы которых представляют собой вершины W_2 .

Во втором случае вершина v имеет инцидентность не только с $n - 1$ «новым» ребром, но и со «старыми» ребрами. Среди вершин, смежных с v , выделяют $n - 1$ вершин со степенью $n - 1$. Исходную вершину v и выделенные $n - 1$ вершины степени $n - 1$ объединяют во множество W_2 . Далее окрашиваются вершины W_2 , а также $\frac{n(n-1)}{2}$ ребер, концы которых представляют собой вершины множества W_2 .

Работа процедуры γ_2 завершается проверкой: образует ли множество выделенных таким образом вершин и ребер n -вершинный полный граф. Если да, то шаг, включающий в себя описанную процедуру γ_2 , завершается результативно, и следует переход к следующему шагу первого этапа. В противном случае, шаг считается безрезультатным, и алгоритм прекращает свою работу с отрицательным ответом на поставленный вопрос распознавания: является ли представленный граф $G = (V, E)$ предфрактальным графом $G = (V, E)$ с двумя полными затравками $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$, где мощности множеств вершин $|W_1| = m$ и $|W_2| = n$, в случае, когда смежность старых ребер не нарушается, где процедура ЗВЗ произведена на нечетных этапах затравкой $H_1 = (W_1, Q_1)$, и $H_2 = (W_2, Q_2)$ на четных.

По окончании первой части описанных выше алгоритмов, осуществляется проверка: все ли вершины исходного графа оказались отмеченными. Если да, то первый этап алгоритмов заканчивает свою работу следующей процедурой. Исходный граф обозначается через G_L^* и представляется в качестве первого члена последовательности $G_L^*, G_{L-1}^*, \dots, G_1^*$. Каждая выделенная затравка стягивается в вершину. Полученный в результате стягивания граф обозначается через G_{L-1}^* . Далее, по отношению к нему реализуется очередной этап алгоритма.

В случае результативной работы каждого из $L - 1$ этапов, в качестве последнего члена последовательности получим m -вершинный полный граф. Этот результат означает получение положительного ответа на вопрос является ли представленный граф предфрактальным графом с непересекающимися «старыми» ребрами, образованным двумя полными затравками $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$, где мощности вершин $|W_1| = m$, $|W_2| = n$, где процедура ЗВЗ производится на нечетных этапах затравкой $H_1 = (W_1, Q_1)$, а на четных – $H_2 = (W_2, Q_2)$.

Принципиальная распознаваемость исследуемого предфрактального графа $G = (V, E)$ вытекает из конструктивного описания алгоритма α и однозначности результатов его работы.

Рассмотрим вопрос о вычислительной сложности алгоритма α . В процессе реализации этапов алгоритма осуществляются следующие операции: определение степени вершины, выявление окрестности радиуса 1 для этой вершины, просмотр всех пар вершин графа на предмет смежности, выделение и окрашивание ребер. Так как эти операции выполняются в пределах одной затравки, то верхняя оценка этапа не превосходит совокупного количества ребер, выделенных и отмеченных в процессе работы этапа. Отсюда, справедлива **теорема**: *Всякий предфрактальный граф $G = (V, E)$ с двумя полными затравками распознается алгоритмом α , где смежность старых ребер не нарушается, с вычислительной трудоемкостью алгоритма $\tau(\alpha) \leq O(|E|L)$.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик, А.Л. Методы распознавания [Текст]/А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. –М.: 2004.
2. Емеличев, В.А. Лекции по теории графов [Текст]/В.А. Емеличев [и др.]. –М.: 1990.
3. Кочкаров, А.М. Распознавание фрактальных графов: Алгоритмический подход [Текст]/А.М. Кочкаров. –Нижний Архыз, 1998.
4. Мандельброт, Б. Фракталы, случай и финансы [Текст]/Б. Мандельброт. –М.: 2004.
5. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные законы [Текст]/М Шредер. –М.: 2005.
6. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст]/Б. Мандельброт. –М.: 2002.

УДК 669.5

А.Л. Рутковский, И.И. Болотаева, Т.А. Юрошева

АЛГОРИТМ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА ЦИНКА

Большинство технологических процессов в металлургии цветных металлов моделируются сложными, существенно нелинейными уравнениями, которые не могут быть линеаризованы путем функционального преобразования переменных, входящих в модель.

Задачи статистической оптимизации подобных процессов, возникающие при разработке и реализации АСУТП цветной металлургии, формально сводятся к параметрическому анализу

систем идентификации с антиинтуитивным поведением математической модели по данным измерений входных и выходных координат процесса [1] и последующего определения оптимальных значений входных переменных, обеспечивающих экстремум некоторого функционала. Такая постановка соответствует решению задачи математического программирования [2]:

$$F(\alpha) = \min. \quad (1)$$

При ограничениях

$$\sigma_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

и

$$H_j(x) = 0, j = m + 1, \dots, n, \quad (3)$$

где x – вектор входных управляемых переменных; F – критерий оптимальности; σ_i – функции ограничений типа неравенств; H_j – функции ограничений типа равенств.

Наиболее часто в практических задачах встречаются ограничения типа неравенств, которые учитывают максимально допустимые ограничения на измерения технологических режимов процесса.

Решение задачи оптимизации сводится к замене (1)–(3) к некоторым функционалам, содержащим штрафную функцию, что приводит к задаче последовательной безусловной минимизации [3].

Общим требованием к штрафной функции является ее рост по мере удаления за пределы границы допустимой области и выполнение условия:

$$\lim P(\sigma_i(x), M_j(x)) \rightarrow 0. \quad (4)$$

В конце решения задачи (здесь $P(\cdot)$ штрафная функция).

Для решения задачи математического программирования известно достаточно алгоритмов [3], однако только методы нулевого порядка являются достаточно простыми и надежными для реализации в задачах анализа систем с антиинтуитивным поведением в АСУТП, т. к. координаты объекта измеряются с погрешностями и вычисление производных сложных функционалов невязок с необходимой точностью невозможно.

Наиболее широкое распространение для этой цели получил последовательный симплексный поиск, первоначально созданный в связи со статистическим планированием эксперимента [4–6].

Нами использован модифицированный симплексный метод решения задачи нелинейного программирования [7].

Сущность метода заключается в том, что отраженная точка располагается на проектирующей прямой в положении, обеспечивающем минимум целевой функции в каждом цикле отражения, т. е. коэффициент отражения не является постоянной величиной, а определяется процедурой одномерной минимизации, исходя из требования опти-

мальности отраженной точки.

Следовательно, исходная задача сводится к решению последовательности задач одномерной минимизации:

$$R(x, \alpha) = \min, \quad (5)$$

что значительно проще.

При этом координаты отраженной точки определяют любым подходящим методом одномерной минимизации по α из процедуры:

$$x_{i0} = x_i^* + \alpha(x_i^* - x_i^h), \quad (6)$$

где x_{i0} – координаты отраженной вершины, обеспечивающие (5); x_i^* – координаты центра симплекса, без учета вершины, где целевая функция имеет наибольшее значение; x_i^h – координаты вершины с наибольшим значением целевой функции; α – коэффициент отражения, параметр одномерной минимизации.

В разработанном алгоритме для определения α нами использован метод «золотого сечения» [3].

Для решения задачи (5), (6) предложена целевая функция, наиболее подходящая к процедуре последовательной безусловной минимизации [7]:

$$R(x) = F(x) + P(G, H) = F(x) + \gamma \left[\sum_{j=m+1}^n (H_j(x))^2 + \sum_{i=1}^m \left(\frac{G(x) + |G(x)|}{2} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где $\gamma > 0$ – параметр, возрастающий по мере приближения к оптимуму.

Целевая функция такого вида удовлетворяет (4) и позволяет генерировать последовательность точек, среди которых могут быть как допустимые, так и недопустимые. Информация о значениях функции в недопустимой (2) и (3) области позволяет более точно определить направление движения оптимума и ускоряет сходимость. Очевидно, что при достаточно большом значении γ в точке, обеспечивающей минимум (7), значение функции штрафа будет как угодно близко к нулю. Однако в начале поиска γ не должно быть большим. В разработанном алгоритме точка окончания поиска при фиксированном γ служит начальной точкой нового цикла при увеличенном его значении.

Алгоритм реализуется следующим образом.

Вычисляется значение целевой функции $R(x_H)$ при фиксированной величине $\gamma = 10$ для начальной точки поиска:

$$x_H = \{x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}\}^T. \quad (8)$$

Решение начинается с построения исходного регулярного симплекса с центром тяжести, совпадающим с начальной точкой. Вокруг этой точки можно построить бесчисленное множество регулярных симплексов. Нами использованы два способа ориентировки [3, 4].

При первом из них координаты вершин определяются следующим образом:

$$x_{ij} = x_{iH} + Sq_{ij}, \quad (9)$$

где x_{ij} – значение i переменной в j вершине; S – размер ребра симплекса,

$$q_{ij} = \begin{cases} -\frac{1}{\sqrt{2i(i+1)}}, & \text{при } j-i-1 < 0, \\ +\frac{i}{\sqrt{2i(i+1)}}, & \text{при } j-i-1 = 0, \\ 0, & \text{при } j-i-1 > 0. \end{cases} \quad (10)$$

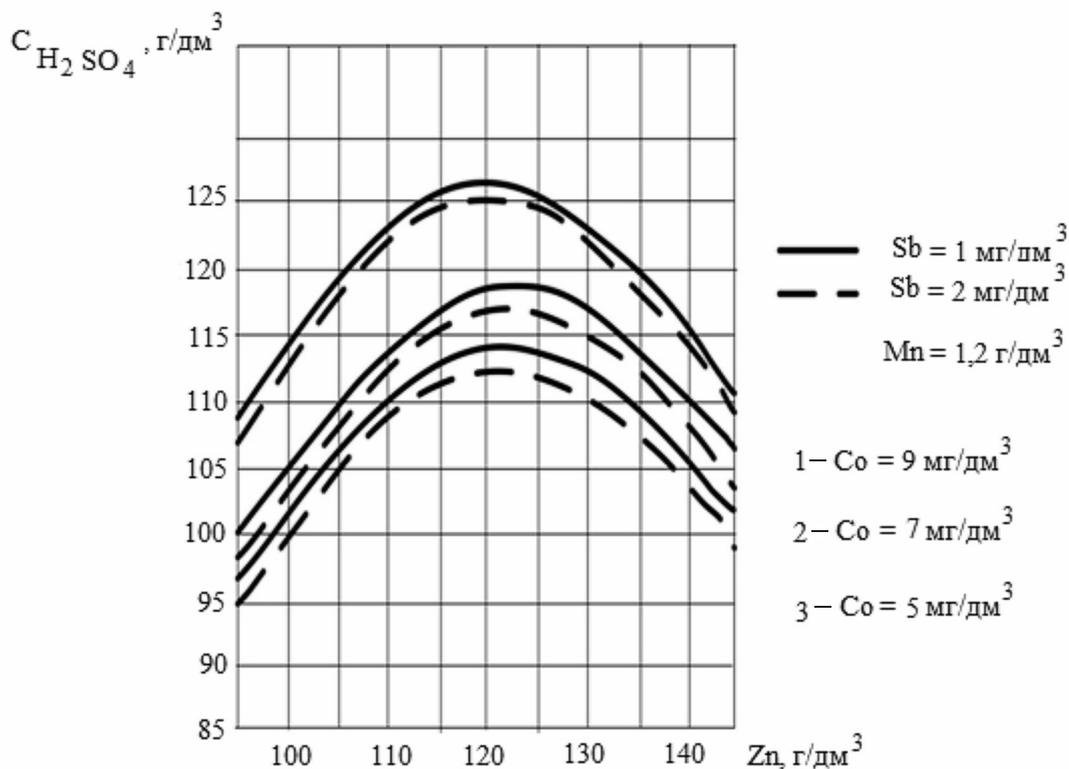
Во всех вершинах исходного симплекса определяется значение целевой функции и сравнивается с $R(x_H)$.

Если окажется, что во всех вершинах значение функции больше, чем в центре симплекса, то строится новый симплекс вокруг той же начальной точки. При этом ребро симплекса уменьшается в соотношении золотого сечения до 0,62 от предыдущего, а симплекс переориентируется следующим образом:

$$q_{ij} = \begin{cases} \sqrt{\frac{i}{2(i+1)}}, & \text{при } j-i-1 < 0, \\ -\frac{1}{\sqrt{2i(i+1)}}, & \text{при } j-i-1 = 0, \\ 0, & \text{при } j-i-1 > 0. \end{cases} \quad (11)$$

Такая процедура продолжается до тех пор, пока ребро симплекса не станет меньше заданного или отыщется точка, в которой значение функции меньше, чем в исходной точке.

В первом случае поиск считается законченным. Во втором – переходит к вычислению по (5), (6) координат новой вершины вместо той, в которой наибольшее значение функции.



Сечение модели процесса при оптимальных значениях параметров

В ситуации, когда ребро симплекса еще больше заданного, а уменьшение функции цели незначительно (явление частое для функции со сложной топологией), в методе предусмотрено повторение процедуры поиска с ребром симплекса равным начальному, причем за исходную принимают точку, имеющую наименьшее значение целевой функции в последнем построении симплекса.

При значении ребра симплекса до заданных размеров цикл поиска заканчивается, и найденная точка служит исходной для нового поиска при

$$\gamma_k = 10 \cdot \gamma_{k+1}. \quad (12)$$

Это ужесточает требование к соблюдению ограничений, которые будут выполняться в конце поиска с любой необходимой точностью. Общий поиск заканчивается при превышении параметром γ заданной величины.

Разработанный алгоритм проверен на наборе тестовых функций [3, 4] и показал высокую точность достижения точки оптимума и большую скорость сходимости. Затраты машинного времени для наиболее сложных овражных тестовых функций четвертого порядка составляли несколько секунд. Это позволило применить разработанную методику для отыскания оптимальных параметров нейтрального раствора, подаваемого на электролиз в производстве цинка.

С этой целью использованы данные анализов усредненных значений содержаний Zn, Co, Mn, Pb в нейтральном растворе и соответствующие им значения кислотности отработанного электролита, которые соответствовали всему возможному диапазону изменения этих параметров. Всего информационный массив содержал тридцать зна-

чений каждого параметра. Путем построения парных регрессий и анализа остатков была определена структура модели [8, 9], содержащая восемь неизвестных параметров.

Решением задачи минимизации суммы квадратов отклонений расчетных и истинных значений кислотности отработанного электролита получена модель

$$C_{H_2SO_4} = 100 \sqrt{\frac{1 + \frac{10,045}{Co} + 0,13Mn - 0,002Mn^2 + 0,0033 \frac{Co}{Sb} + 0,025Pb}{2,61 + 0,0014(122,3 - Zn)^2}}. \quad (13)$$

Модель обеспечивает среднеквадратичную ошибку адекватности 0,69 г/дм³ H₂SO₄ при размахе 50 г/дм³, что говорит о ее высокой точности и возможности использования для расчета оптимальных параметров нейтрального раствора.

Поиск максимума выражения (13) с использованием штрафной функции типа (7) в области, ограниченной допустимым диапазоном изменения концентрации Co, Mn, Pb и Zn, позволили определить, что максимум кислотности отработанного электролита $C_{H_2SO_4} = 127,7$ г/дм³ (и, следовательно, максимальное значение извлечения цинка) достигается при концентрации Co = 4,4 мг/дм³, Mn = 12,09 г/дм³, Pb = 1,07 мг/дм³, Zn = 123,3 г/дм³.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при постоянной в среднем токовой нагрузке на процесс извлечения цинка оказывает влияние определенное сочетание параметров, а их заданная комбинация дает возможность оптимизировать процесс электролиза. На рисунке показано одно сочетание параметров модели (13), иллюстрирующее указанное положение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин, Л.А. Выбор структуры уравнений регрессии для описания процессов в аппаратах идеального перемешивания [Текст]/Л.А. Данилин, А.Л. Рутковский//Изв. вуз. Сер. Цветная металлургия.-1981.-№ 3.-С. 97-102.
2. Базара, М. Нелинейное программирование [Текст]/М. Базара, К. Шотти//Теория и алгоритмы.-М.: Мир, 1982, 582 с.
3. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст]/Д. Химмельблау.-М.: Мир, 1982.-584 с.
4. Дамбраускас, А.П. Симплексный поиск [Текст]/
- А.П. Дамбраускас.-М.: Энергия, 1979.-175 с.
5. Spendley, W. Segmental application of simplex designs in optimization and evolutionary operation [Текст]/W. Spendley, G.R. Hext, F.R. Himesworth//Technometrics.-1962.-Vol. 4.-№ 4.-P 441-461.
6. Milder, I.A. Simplex method for function minimization [Текст]/ I.A. Milder, R.A. Mead//The Computer Journal.-1965.-Vol 7.-№ 1.-P 307-313.
7. Салихов, З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами [Текст]/ З.Г. Салихов, Г.Г. Арунянц, А.Л. Рутковский.-М.: Теплоэнергетик, 2004.-495 с.

8. **Химельблау, Д.** Анализ процессов статистическими методами [Текст]/Д. Химельблау.–М.: Мир, 1973.–960 с.

9. **Сейдж, Э.П.** Идентификация систем управления [Текст]/Э.П. Сейдж, Дж.Л. Мелса.–М.: Наука, 1974.–248 с.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Ключевым фактором, определяющим конкурентоспособность предприятий приборостроения, является оперативность реагирования на изменения рынка. Глубокая кооперация производственной деятельности заставляет специалистов предприятия постоянно отслеживать возможности контрагентов, появление нового оборудования, изменения технологических возможностей предприятий [1]. С одной стороны, сегодня ни одно крупное или среднее предприятие не обладает парком оборудования и технологическими возможностями для самостоятельного изготовления приборов и изделий. С другой стороны, вопросы оптимальной загрузки собственного оборудования остаются наиважнейшими при определении себестоимости продукции. Таким образом, минимизация производственных издержек достигается оптимальным планированием производственных процессов внутри предприятия и оптимальной кооперацией взаимодействия с контрагентами.

Информационные системы поддержки решения этих задач обеспечиваются пакетами программ АСУ, АСУП, АСУТП, Электронная биржа, Субконтрактинг [3, 4] и др. К наиболее развитым системам следует отнести АСУ, АСУП, АСУТП.

Концепция их создания разработана в 70-е гг. XX в., и в настоящее время спектр их реализаций исключительно широк: от SAP R/3 до корпоративных систем для малых предприятий. На рис. 1 показаны модули системы управления производством «Ресурс-мастер» [2]. Эта универсальная, открытая, гибкая система поддерживает бизнес-логику производственных процессов и может интегрироваться с внешними приложениями CAD/CAM.

Проектирование информационных систем поддержки кооперации предприятий началось с 2000-х гг. Этот процесс связан с передачей предприятиям полной ответственности за финансовую и хозяйственную деятельность. Современный прибор объединяет в себе передовые научные идеи, реализованные с помощью новейших технологий на уникальном оборудовании. Качество в приборостроении обусловлено применением новых материалов, методов сбора и обработки данных, полученных на стыке разных научных направлений. Изготовление и наладка отдельных компонент и узлов современных приборов – сложный и дорогостоящий процесс; приборы выпускаются, как правило, мелкосерийно, отдельными партиями, поэтому роль кооперации технологических и сборочных процес-

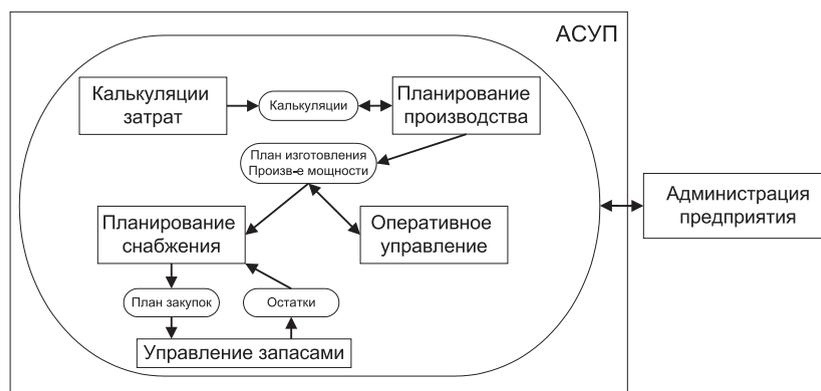


Рис. 1. АСУП «Ресурс-мастер»



Рис. 2. Электронная биржа

сов существенно возрастает. На рис. 2 приведена схема взаимодействия предприятия с электронной биржей. Электронная биржа – это информационный ресурс, объединяющий участников производственной кооперации (заказчиков и исполнителей). Целью их взаимодействия является сокращение времени поиска контрагентов для выполнения конкретных работ (заказов). Электронная биржа предоставляет заказчику доступ к справочной информации о потенциальном исполнителе (реквизиты, направления производственной деятельности, стоимость услуг и др.). Исполнителю предоставляется доступ к перечню работ, которые еще не распределены на данный момент времени. Положительным результатом взаимодействия заказчика и исполнителя с электронной биржей будет договор или контракт на выполнение конкретного вида работ. Таким образом, электронная биржа решает задачу установления договорных отношений между субъектами хозяйственной деятельности с минимизацией времени поиска партнеров.

Следующим уровнем развития кооперации предприятий станет объединение технологических возможностей в один информационный ресурс. Категория «технологические возможности предприятия» включает: оборудование, оснастку, технологии, кадровое и материальное обеспечение производства. Информационные системы этого класса (ИСТВП – информационная система технологических возможностей предприятий) разрабатываются для поддержки конструкторской и технологической деятельности при создании новых образцов приборов или их модификации. Процесс проектирования нового изделия – это итеративный процесс построения и анализа множества вариантов возможных реализаций, удовлетворяющих техническому заданию. Все локальные решения тесно взаимосвязаны и зависят одно от другого. Эффективность конечного результата определяется временем разработки проекта и возможностью его реализации с минимальными затратами.

Системы класса ИСТВП позволяют на самых ранних этапах реализации проекта определить конкретные варианты реализации конструктор-

ских решений на оборудовании, доступном в данный момент времени. Установление связи между замыслом конструктора и его практической реализацией сокращает число итераций в процессе проектирования и время изготовления нового изделия. На рис. 3 приведена схема взаимодействия ИСТВП с пользователями. Главной особенностью модели данных ИСТВП является отображение уникальных технологических возможностей предприятия: оборудования, оснастки, технологических процессов сборки и настройки приборов, наличия высококвалифицированных кадров, – т. е. существенных отличий конкретного производства. Именно уникальные технологические возможности определяют качество конечного изделия. Как правило, речь идет о дорогостоящем оборудовании, которое представлено единичными экземплярами с эпизодической загрузкой.

Внедрение ИСТВП позволяет сократить периоды жизненного цикла изделия, время на проектирование и разработку продукции; улучшить планирование и контроль процессов, а также повысить эффективность использования дорогостоящего оборудования.

Рассмотрим вопросы представления данных в ИСТВП. Технологические возможности предприятий охватывают практически все виды производственной деятельности, спектр которых постоянно расширяется. Исходя из этого, модель представления данных должна быть открытой. С другой стороны, многообразие производственных процессов существенно затрудняет построение объектной модели данных, т. к. многие из них несопоставимы по видам обработки, операциям, переходам и другим характеристикам. В подобных случаях решением задачи представляется детальная декомпозиция всех сущностей, которая формирует базовый уровень предметной области, позволяющий синтезировать любое многообразие объектов и процессов.

Сформулируем основные требования к ИСТВП:

обеспечение представления производственных

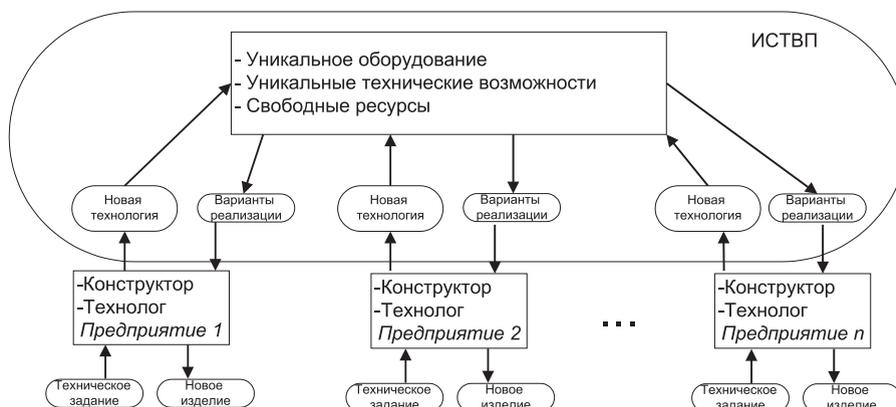


Рис. 3. Структура ИСТВП

возможностей предприятий приборостроения;
 обеспечение возможности представления заказов предприятий;
 осуществление автоматического поиска субподрядчиков;
 поддержка обмена между участниками системы необходимыми для проектирования и производства данными.

Рассмотрим варианты решения двух задач:

разработка структуры данных для описания производственных возможностей и заказов предприятий;

создание алгоритма поиска потенциальных исполнителей заказа.

Структура данных для описания производственных возможностей и заказов предприятий. Модель данных ИСТВП представляет связанный граф, узлами которого являются сущности приборостроительного производства, а ребрами – связи между ними. Набор сущностей, операций и переходов формируется в соответствии с «Классификатором технологических операций машиностроения и приборостроения» [6] и «Классификатором технологических переходов машиностроения и приборостроения» [5]. Эти классификаторы широко используются предприятиями и могут применяться для описания производственного заказа при формировании технического предложения потенциальным партнерам.

Формализация описания производственных возможностей оборудования с использованием тех же классификаторов, что и для описания ТП, и разработка метода установления соответствия описания ТП производственным возможностям оборудования, позволит реализовать автоматический поиск потенциальных исполнителей ТП.

Каждый переход технологического процесса может быть описан конечным вектором параметров, каждый из которых имеет собственное значение

(диапазон) и единицу измерения. Каждый переход закрепляется за одной или несколькими операциями. Назначение переходов операциям и параметров – переходам производится экспертной оценкой.

Описание возможностей оборудования представляется и набором параметров: виды обработки, используемый инструмент, габаритные размеры рабочего стола, предельные размеры обрабатываемой заготовки, режим работы, допустимые нагрузки и т. п. Для выявления перечня операций и переходов со значениями (или диапазонами) параметров, обеспечиваемых конкретной моделью оборудования, требуется экспертная оценка.

Базовая версия модели данных ИСТВП содержит четыре блока:

- справочники (оборудование, операции, переходы);
- перечень оборудования и данные предприятий;
- описание заказа;
- регистрации и взаимодействия пользователей.

Справочник оборудования содержит классификатор станков (оборудования) и классификатор переходов (операций), выполняемых на данных станках – паспортные данные, заполняемые экспертами. Перечень оборудования предприятия описывает оборудование и особенности технологических переходов конкретных предприятий (параметры переходов с учетом износа и модернизации оборудования) – данные предоставляются предприятиями (могут использоваться пользователями после модерирования администратором БД) или копируются из справочника оборудования.

Классификатор станков основан на существующем классификаторе металлорежущего оборудования [7]. Он позволяет группировать оборудование по способу обработки заготовки (типу выполняемых переходов) и модели; состоит из таблиц: группа оборудования, тип станков, модели станков.

Классификатор переходов основан на «Классификаторе технологических переходов машиностроения и приборостроения» [6], содержит описание переходов, включающее название, код (два символа обозначения действия и три цифры кода предмета труда), тип, вид операции и вид обработки, к которым принадлежит данный переход. В системе сформированы две независимые классификации переходов: по операциям и группам переходов. Переходы группируются в операции. Описание операций основано на «Классификаторе технологических операций машиностроения и приборостроения», хранится в таблице «Операции» и содержит название и четырехзначный код операции. Операции объединяются в группы операций (по первым двум цифрам кода) и хранятся в отдельной таблице.

Классификатор переходов позволяет группировать переходы по группе атрибутов перехода и их значений, по типу перехода. Любой переход может быть закреплен за конкретным станком.

Таблицы, входящие в классификатор переходов, содержат названия переходов, типы и коды переходов, обозначение групповой операции, виды обработки.

Параметры перехода – значения, диапазоны значений или списки значений для описания возможностей оборудования в форме определения предельно достижимого качества выполнения перехода. Параметры перехода содержат сведения о переменных параметрах норм времени и точности обработки оборудования (например, припуск, число ходов, скорость обработки, машинное время). Параметр перехода описывается названием параметра, типом параметра (значение, интервал, набор), типом значения (целое число, число с плавающей точкой, текст), единицей измерения, которые связываются с переходом через таблицу параметров.

Атрибуты перехода описывают основные характеристики оборудования, на котором выполняется данный переход (габариты рабочей области, число степеней свободы приводов, числа сменного инструмента). Использование атрибутов перехода позволяет проводить более точную классификацию оборудования, чем по типоразмеру, осуществлять более гибкий поиск оборудования.

Для описания атрибутов используется таблица «Атрибуты перехода». Она содержит название атрибута перехода (копируется из справочника) – идентификатор типа параметра, названия параметра, типа значения и единицу измерения.

Система обеспечивает динамическое формирование перечней параметров, атрибутов, наборов

параметров, наборов атрибутов, и их числовых значений.

Для более точного описания требований к технологическим возможностям оборудования, атрибуты перехода объединяются в группы (пример группы: наибольшая ширина стола, наибольшая высота стола, наибольшая масса заготовки). Группирование атрибутов обеспечивается таблицей «Группа атрибутов». Она содержит группу атрибутов, задающую конкретный переход, идентификаторы операции и атрибута перехода.

«Группа атрибутов» получает свой идентификатор, который используется для последующего назначения конкретных значений параметрам данного перехода, выполняемого на заданной модели оборудования. Параметры и атрибуты переходов связываются со своими значениями через служебные таблицы.

Общая информация о предприятии хранится в таблице «Предприятие». Данные, описывающие станочный парк предприятия, содержатся в следующих таблицах: «Оборудование предприятия», «Группа станков» (объединяет станки по значениям параметров выполнения переходов и загрузке), «Переходы предприятия». Значения атрибутов и параметров переходов, выполняемых на предприятии, хранятся в служебных таблицах.

Блок заказа содержит перечень операций, переходов и значений их параметров.

Данный раздел используется для описания технологий, необходимых заказчику, для поиска предприятия исполнителя среди участников системы. Заказ состоит из перечня операций, неформального (текстового) описания технологии, набора переходов, содержащего значения параметров и атрибутов, а также файлы – приложения заказа (чертежи, схемы, модели).

Блок содержит следующие таблицы: «Описание заказа» (название, принадлежность пользователю, права), «Переходы заказа» (порядок выполнения, значения параметров и атрибутов).

Значения параметров и атрибутов переходов заказа хранятся аналогично значениям параметров и атрибутов классификатора оборудования и перечня оборудования предприятия в служебных таблицах.

Блок авторизации и взаимодействия пользователей используется для разграничения прав доступа, регистрации действий пользователей и обеспечения обмена данными участниками системы

Алгоритм поиска исполнителей заказа. Поиск исполнителей заказа осуществляется на графе, состоящем из сущностей технологических возможностей предприятия. Исходными данными поиска

являются отдельные переходы (или операции) с указанием значений параметров или группы переходов. Результатом поиска является оборудование, способное выполнить заданный переход с требуемым качеством. Задача поиска может быть успешно решена при наличии в базе данных одного экземпляра нужного оборудования. В то же время наличие в базе данных универсального оборудования или нескольких экземпляров оборудования приведет к формированию нескольких вариантов ответа на запрос, при этом число вариантов будет быстро расти при обработке запроса на поиск группы переходов (операций). В последнем случае число вариантов будет расти экспоненциально. Для ограничения числа вариантов ответов следует ввести критерии отбора. Например: выполнение запроса на одном предприятии; выполнение запроса на минимальном числе оборудования; выполнение запроса с минимальным числом переустановок изделия и др. Рассмотрим алгоритм выполнения запроса с критерием отбора «на минимальном числе предприятий».

Для решения данной задачи предлагается следующий алгоритм.

На подготовительном этапе в результате перебора всех участвующих в поиске переходов заказа и выбора (сравнивая значения параметров и атрибутов заказа и оборудования предприятий) оборудования предприятий, способного обеспечить данные требования, формируется массив, содержащий всех возможных исполнителей каждого перехода заказа. Описанный массив имеет следующую структуру:

Массив_исполнителей[Иден_перехода_заказа][номер_исполнения][иден_предприятия]

На первом шаге выбирается одно или несколько оптимальных предприятий. Оптимальным считается предприятие, которое может обеспечить выполнение максимального числа переходов заказа.

Шаг 1. Формирование массива количества переходов, выполняемых предприятием:

Подсчет_исполнителей[иден_предприятия]=[количество_участий].

Для этого по всем вариантам исполнения массива «Массив_исполнителей» подсчитывается число переходов, выполняемых различными заводами. Если определен элемент:

Подсчет_исполнителей[иден_текущего_предприятия],

то количество переходов, выполняемых данным предприятием, увеличивается на единицу. В противном случае устанавливается:

Подсчет_исполнителей[иден_текущего_предприятия]=1.

Подсчет предприятий осуществляется для выявления особого случая, которым является вариант, когда все предприятия по одному разу встречаются в массиве исполнителей. Если возможно выделить предприятия, участвующие не более одного раза, то осуществляется переход к шагу 2; если все заводы участвуют в массиве по одному разу – переход к шагу 3.

Шаг 2. Формирование массива выбранных исполнителей:

Выбранные_исполнители[иден_предприятия]=[количество_выполн_переходов].

Для этого оцениваются исходные данные с учетом массива «Подсчет_исполнителей».

Шаг 3. Особый случай, каждый завод встречается единожды. Необходимо последовательно формировать цепочки вариантов исполнения заказа. Например, если массив исполнителей имеет вид (ключи: идентификатор перехода, порядковый номер исполнителя, идентификатор исполнителя):

Массив_исполнителей [1367][1][116]
[2][117]
[1368][1][118],

то массив «Выбранные_исполнители» будет сформирован следующим образом:

[116] = 1, [117] = 1, [118] = 1,

следовательно, если не рассматривать этот случай отдельно, входами для четвертого шага будет набор 116,117,118 (идентификаторы записей таблицы «Enterprise»). Дальнейшая работа алгоритма по формированию цепочек исполнителей представлена на рис. 4. Цепочка исполнителей – это последовательность предприятий исполнителей, в соответствии с последовательностью переходов в технологическом процессе.

Из представленных результатов видно, что при такой работе алгоритма происходит дублирование вариантов исполнения заказа. Требуется последующая оценка всех вариантов исполнения на предмет повторений. Для того чтобы избавиться от лишних операций сравнения и сократить время работы, необходимо на этапе формирования

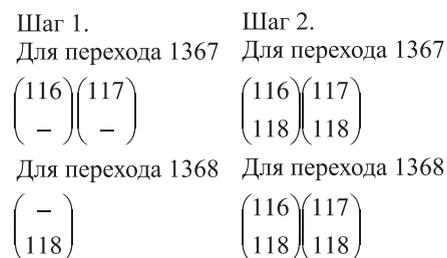


Рис. 4. Пример формирования цепочек исполнителей

последовательности исполнителей ввести механизм, исключающий дублирование цепочек. Для исключения дублирования размечается исходный массив исполнителей, структура дополняется полем «флаг», которое является признаком выбора предприятия. Корректируя структуру «Массив_исполнителей», формируется структура:

Массив_исполнителей[Иден_перехода_заказа][номер_исполнения][иден_предприятие][флаг]

Идея заключается в последовательном заполнении цепочек исполнителей переходов (для каждого перехода отдельно), начиная с первого. Ранее формирование осуществлялось по критерию максимального количества выполняемых переходов предприятием («Массив_исполнителей»). При этом заполнение структуры «Подсчет_исполнителей» происходит только теми заводами, которые могут обеспечить выполнение текущего перехода, в остальных случаях (не все предприятия встречаются единожды) он заполняется всеми предприятиями, участвующими в неразмеченных переходах. Таким образом, результат работы алгоритма будет следующим (рис. 5).

При таком изменении дублирования одинаковых последовательностей не происходит. Переход к шагу 5.

Шаг 4. Найден набор оптимальных заводов. В лучшем случае, завод единственный. Исходный массив размечается (поле «флаг» устанавливается в 1) с учетом найденных предприятий.

Шаг 5. Формируется структура, элементами которой являются размеченные массивы исполнителей:

Варианты_исполнения[номер_варианта_исполнения].

Если структура данных «Выбранные_исполнители» содержит несколько заводов – число вариантов исполнения увеличивается в зависимости от количества заводов. На выходе этапа имеем набор массивов, размеченных флагами (пред-

Шаг 1.

Для перехода 1367

$$\begin{pmatrix} 116 \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 117 \\ - \end{pmatrix}$$

Шаг 2.

Для перехода 1368

$$\begin{pmatrix} 116 \\ 118 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 117 \\ 118 \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Пример формирования цепочек исполнителей

приятие, отмеченное флагом 1, учтено в цепочках исполнения данного перехода).

Шаг 6. Производится проверка наличия исполнителя каждой сформированной цепочки (проверки поля «флаг» массива) *Варианты_исполнения*, содержащего единицу, в случае, если данному переходу назначен исполнитель. Если исполнители всех переходов во всех вариантах исполнения определены, алгоритм заканчивает работу. При наличии свободных (исполнитель не назначен) переходов повторяется первый шаг, в качестве исходных данных используется элемент массива *Варианты_исполнения*, из рассмотрения исключаются переходы, которым по результатам предыдущих проходов назначены предприятия (т. е. из рассмотрения исключаются переходы, помеченные флагом 1). На оставшихся переходах алгоритм выполняется повторно.

Предложенная структура ИСТВП обеспечивает сокращение периодов жизненного цикла изделия на этапах проектирование и разработки новых изделий. Разработанная структура представления данных позволяет описать технологические возможности предприятий и реализовать описание производственного заказа в удобном для технолога виде. Предложенный алгоритм поиска вариантов обеспечивает получение решения за полиномиальное время.

С помощью внедрения ИСТВП можно осуществить мониторинг технологических возможностей предприятий приборостроения и повысить конкурентоспособность отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голландцев, Ю.А. Информационно-управляющая система поиска партнеров с использованием инструментальных средств систем класса ERP [Текст]/Ю.А. Голландцев, В.А. Дубенецкий//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 4.
2. [Электронный ресурс] <http://isresurs.spb.ru>
3. Портал информационной поддержки малого и среднего информационного бизнеса [Электронный ресурс] www.subcontract.ru
4. Санкт-Петербургский фонд поддержки промышленности. Информационная система субконтрактинга

[Электронный ресурс] www.fpp-iis.ru

5. Классификатор технологических операций в машиностроении и приборостроении [Текст]. –М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, Ч. 1, 1975.–24 с.; Ч. 2, 1978.–32 с.
6. Классификатор технологических переходов машиностроения и приборостроения [Текст]. –М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1991.–120 с
7. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: т. 2 [Текст]/А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков; 7-е изд. –М.: Машиностроение, 1986. –496 с.

КОНТЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДОСТУПОМ К РЕСУРСАМ СЕТИ ИНТЕРНЕТ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

Компьютеризация и информатизация образовательных учреждений переживает период бурного развития. Интернет является важным элементом системы образования, т. к. содержит в публичном доступе ряд ценнейших первоисточников – электронные библиотеки, музеи, периодику, тематические подборки материалов, профессиональные справочники, словари, клубы по интересам, и в связи с тем, что начала компьютерной грамотности сейчас немыслимы без наглядной демонстрации и освоения приемов доступа в сеть, поиска информации, работы с электронной почтой и средствами персональных коммуникаций.

Однако Интернет, помимо образовательных целей, зачастую используется школьниками для развлечений: посещения чатов, игровых сайтов и сайтов сомнительного содержания (религиозных сект, террористических и криминальных организаций и других сайтов с нежелательным содержанием).

Другой проблемой при подключении школ к сети является необходимый минимум сетевой защиты. Школьная сеть должна быть защищена от несанкционированного проникновения, взлома, вандализма, хищения и порчи внутренних информационных ресурсов.

В силу социальной и экономической ситуации в стране двумя естественными ограничениями для построения полномасштабной системы защиты информации являются:

относительно невысокий бюджет школьной информатизации;

отсутствие в школах квалифицированных кадров для построения системы защиты.

Поэтому крайне важно обеспечить простое, эффективное и полнофункциональное решение

для построения информационной безопасности уровня школы или регионального сегмента учреждений образования.

Существует большой выбор межсетевых экранов, антивирусов и других программных и программно-аппаратных комплексов для решения подобных задач.

Однако до последнего времени недостаточно внимания и ресурсов уделялось проблеме управления доступом к формально безопасному, с точки зрения других компонент системы обеспечения безопасности, содержимому сайтов. Данную задачу решают при помощи контентной фильтрации, которая технологически реализуется различными способами, но конечная ее цель – изолировать пользователя от нежелательной информации.

Контентная фильтрация – это функция управления доступом пользователей к специфическим типам информации на основе анализа содержимого информационных объектов (веб-запросы пользователей, содержимое веб-страниц) и определения соответствия их параметров принятой политике безопасности.

Под политикой безопасности понимается набор правил по доступу к ресурсам сети, которые назначаются для пользователей и групп пользователей.

Постановка задачи

Система контентной фильтрации (СКФ) – это технологическое решение, основной задачей которого является предоставление сервиса управления доступом пользователей к ресурсам Интернет. СКФ отвечает за управление доступом пользователей к ресурсам Интернет в зависимо-

сти от категории запрашиваемых ресурсов и принятой организационной политики.

Лидирующие системы контентной фильтрации основываются на принципе анализа и категоризации Интернет-ресурсов, что признано наиболее эффективным методом фильтрации нежелательных данных. Эти системы используют регулярно обновляемые базы URL, гибкие настройки фильтра и развитые системы отчетности. Они хорошо работают с англоязычными сайтами, но имеют ограниченные возможности работы с данными на других языках.

В ситуации с русскоязычными сайтами существующие контентные фильтры имеют ряд недостатков, это:

некорректная работа с русскоязычными ресурсами по причине отсутствия специальных инструментов работы с информацией на русском языке;

бедность базы данных русскоязычных ресурсов;

отсутствие возможности объединения данных от разных организаций с целью консолидации отчетности.

Разрабатываемая СКФ должна быть ориентирована на русскоязычный контент и использовать эффективные алгоритмы URL-фильтрации. Однако наравне с отличной способностью работать с русскоязычными данными, СКФ также должна работать с другими основными языками мира.

СКФ должна проверять запросы на принадлежность ссылки к конкретной категории. В случае запрещенной категории обращение к ресурсу блокируется.

Когда локальный контентный фильтр не имеет информации о запрашиваемом Интернет-ресурсе, пользователь должен получить доступ к этому ресурсу, а контентный фильтр должен передать новую неизвестную ссылку в центральную базу системы категоризации. Там ресурс относится к одной из категорий, и соответствующая информация поступает в локальную базу ресурсов контентного фильтра при ближайшем обновлении списка ссылок.

СКФ должна предоставлять следующие возможности для настройки правил фильтрации:

настройка правил доступа для отдельного пользователя или групп пользователей;

управление доступом к ресурсам на уровне категорий и отдельных сайтов. «Черные» и «белые» списки;

календарь применения правил доступа;

регулируемый уровень управления доступом: мониторинг, предупреждение о запросе к опасному ресурсу, блокирование опасного ресурса.

Важной особенностью СКФ должна являться гибкость и масштабируемость системы. Улучшенный механизм мониторинга, сбора и представления статистических данных по всей организации будет реализован с помощью специализирован-



Рис. 1. Группировка статистики

ного модуля сбора и обработки статистики обращений пользователей, собираемых локальными контентными фильтрами. Принцип работы такого модуля показан на рис. 1.

Методы контентной фильтрации

Наиболее широкое распространение получили три метода фильтрации:

1. Фильтрация по ключевым словам – когда конкретные слова или словосочетания используются для включения блокировки веб-сайта.

2. Динамическая фильтрация – когда содержимое запрашиваемого веб-сайта анализируется в момент обращения, и загрузка страницы блокируется, если содержимое определяется как нежелательное;

3. URL-фильтрация – когда запрашиваемая страница или целый домен определены или категоризированы как нежелательный ресурс, и блокируются при попытке обращения.

Важными характеристиками методов являются нагрузка на сервер фильтрации и клиентскую машину, а также объем данных, которые клиент получает при запросе. В случае фильтрации по ключевым словам клиент полностью скачивает все данные и анализирует их. При этом сервер должен предоставлять клиенту список ключевых слов и периодически обновлять этот список. Если производится динамическая фильтрация, то сервер сам анализирует содержимое сайта и сообщает клиенту результат.

Если сайт заблокирован, то клиент не получает никаких данных, кроме команды блокировки. В этом случае при большом количестве клиентов очень сильно возрастает нагрузка на сервер. При URL-фильтрации клиент сначала проверяет ссылку по локальной базе категорий и, если адрес есть в базе, решение принимается без обращения к серверу. Если в локальной БД ссылки нет, то клиент отправляет на сервер запрос, содержащий адрес страницы и получает список категорий, с которыми эта ссылка связана. Категории проверяются на наличие запретов, и принимается решение о разрешении или запрещении доступа.

Необходимо так же учитывать объемы данных, хранимых на клиенте и сервере фильтрации. Эти требования важны не с точки зрения характеристик дисковых накопителей (что сейчас не является проблемой), а с точки зрения характеристик СУБД, используемых для работы с этими данными.

Проанализировав различные варианты, мы пришли к выводу, что URL-фильтрация, основанная на анализе и категоризации Интернет-ресурсов, – наиболее эффективный и гибкий метод фильтрации нежелательных данных.

Подходы к категоризации сайтов

При использовании метода URL-фильтрации возникает необходимость категоризации сайтов. Мы уже использовали термин «категория» ранее, а теперь дадим ему определение и рассмотрим различные методы категоризации.

Категория – группа, к которой может быть отнесен сайт на основе некоторых признаков. Категории представлены иерархическим деревом, а в простейшем случае – списком. Категоризация Интернет-ресурсов осуществляется специальной системой тематической категоризации, которая предоставляет данную информацию клиентам СКФ.

Категоризация сайтов и размещенных на них данных может выполняться разными способами. В настоящее время выделяются следующие виды категоризации:

использование predetermined баз категорий сайтов с регулярным обновлением списков сайтов и категорий;

категоризация данных на лету путем анализа содержимого страниц;

использование данных о категории, информацию о принадлежности к которой предоставляет сам сайт.

Категоризация данных и формирование баз категорий обычно производится в полуавтоматическом режиме: на первом этапе выполняются анализ содержимого и определение категории с помощью специально разработанных средств, которые даже могут включать в себя системы распознавания текстов в картинках. На втором этапе полученная информация часто проверяется людьми, принимающими решение о том, к какой категории можно отнести тот или иной сайт.

Многие компании автоматически пополняют базу категорий по результатам работы клиентов, если обнаруживается сайт, не отнесенный ни к одной из категорий.

В настоящее время используются два способа подключения predetermined баз категорий сайтов.

- Использование локальной базы категорий с регулярным ее обновлением. Данный метод очень

удобен для больших организаций, имеющих выделенные серверы фильтрации и обслуживающие большое количество запросов.

- Использование базы категорий, размещенной на удаленном сервере, немного увеличивает нагрузку на каналы связи, но обеспечивает использование актуальной базы категорий. Этот метод часто применяется в различных устройствах – межсетевых экранах, ADSL-модемах и т. п.

Стоит заметить, что оба метода можно удачно скомбинировать, используя центральную базу и небольшой временный список ссылок на клиенте.

К преимуществам применения предопределенных баз категорий можно отнести то, что предоставление или запрет доступа производится еще на этапе выдачи запроса клиентом, что может существенно снизить нагрузку на каналы передачи данных. Главный недостаток использования данного подхода – задержки в обновлении баз категорий сайтов, поскольку для анализа требуется некоторое время. Кроме того, некоторые сайты достаточно часто меняют свое наполнение, из-за чего информация о категории, хранящаяся в базе адресов, становится неактуальной. Некоторые сайты также могут предоставлять доступ к разной информации, в зависимости от имени пользователя, географического региона, времени суток и т. п.

Существующие математические модели категоризации

Простейшая тематическая категоризация.

Тематический профиль – это совокупность данных (перечень терминов), необходимая для принятия решения о принадлежности документа на основе анализа его текстовых данных к заданной категории.

Под термином понимается слово, словосочетание, логическая формула из слов и словосочетаний, содержащая логические операторы.

При автоматическом построении профиля в качестве терминов синтезируются только слова и словосочетания. Кроме того, при автоматическом построении профиля не синтезируются перечни терминов-исключений, когда документ автоматически относится или исключается из категории. Эти операции должен осуществлять эксперт на основе анализа результатов категоризации.

Перед началом категоризации проводится очистка ресурса: удаляется навигационная часть, теги html и скрипты. В случае более глубокого

анализа возможно удаление слов, не несущих смысловую нагрузку [1].

Пусть дан ресурс D , представимый как множество элементов текста $D = \{d_k\}$ и категория C , состоящая из двух подмножеств $C = \{Ca, Cb\}$, где $Ca = \{Ca_j\}$ – множество терминов, которые должны присутствовать в ресурсе D для его отнесения к категории C ; $Cb = \{Cb_j\}$ – множество терминов, которые должны отсутствовать в ресурсе D для его отнесения к категории C . Вычислив количество элементов в пересечениях множеств $|D \cap Ca| = Ra$ и $|D \cap Cb| = Rb$, можно сделать вывод о принадлежности ресурса к категории: если $Ra > \tau$ и $Rb < \vartheta$, то ресурс D относится к категории C . Пороговые значения τ и ϑ задаются экспертом, либо вычисляются в процессе обучения.

Представленная модель применялась ранее в системах, предназначенных для домашнего использования. Системы, реализующие данную модель, нетребовательны к вычислительным ресурсам и легко администрируются. Основная проблема – невозможность учета количества вхождений термина в текст ресурса и веса термина, – все термины имеют одинаковый приоритет, что часто не соответствует требованиям, предъявляемым к системам фильтрации.

Семантическая категоризация. Семантический анализ – процесс выявления смыслового содержания слов и словосочетаний в предложении. Семантический анализ обеспечивает нормализацию синтаксической структуры предложений, распознавание терминов, классификацию терминов по семантическим признакам, с учетом синонимических и гипонимических (отношение «общее – частное») классов, выявление определений терминов.

Степень соответствия найденных документов запросу пользователя характеризуется понятием *релевантность*. Оно не является специфичным для систем информационного поиска. Это понятие возникло из философских теорий, объясняющих относительную связь между источниками информации, и изучается многими направлениями науки. Для организации наиболее релевантно го поиска предлагается использовать онтологии.

Онтологии – новые интеллектуальные средства для поиска ресурсов в сети Интернет, новые методы представления и обработки знаний и запросов. Они способны точно и эффективно описывать семантику данных для некоторой предметной области и решать проблему несовместимости и противоречивости понятий [2, 3].

Формально определим онтологию как множество $O = (L, C, F_l, F_c, R_h)$, где $L = \{(w_i, x_i)\}_{i=1,n}$ – словарь терминов предметной области; w_i – термин; x_i – рейтинг термина w_i относительно других терминов в категории $C = \{c_i\}_{i=1,m}$; $F_l(L) \rightarrow C$ – функция интерпретации терминов; $F_c(c_i) \rightarrow L$ – функция интерпретации категорий; R_h – отношения иерархии между категориями (концепциями) в онтологии.

Запрос на определение соответствия ресурса категории представляется в виде множества терминов из L : $u = \bigcup_m w_m$.

Итоговая формула для $P(c_i | u)$ выглядит следующим образом [4]:

$$P(c_i | u) = \sum_{w \in u} \left(\frac{P(w | c_i)}{\sum_{c' \in C} P(w | c')} \cdot \frac{\text{count}(w, L)}{\sum_{w' \in u} \text{count}(w', L)} \right),$$

где $P(w | c_i) = x_w^i$ – вероятность вхождения термина w в категорию c_i , вес данного термина в данной категории; $\text{count}(w, L)$ – отношение количества вхождений термина w к общей сумме вхождений всех терминов.

Основными недостатками семантических методов категоризации является их привязка либо к определенному языку, либо к группе языков. В приведенной выше модели для каждого языка требуется составление онтологии по каждой группе связанных категорий. Для других подходов семантической категоризации зачастую требуется разработка отдельных моделей для групп языков, примером такой системы является POESIA [5].

Следует отметить, что системы фильтрации на основе семантической категоризации дают очень хорошие результаты для тех групп языков, для которых они были разработаны (около 98 % ресурсов категоризируются правильно).

Тематическая категоризация на основе вычисления весовых коэффициентов терминов, принадлежащих категории. Пусть дано множество ресурсов D , разделенное на два непересекающихся подмножества T_r и T_s , называемых «обучающей» и «тестовой» выборкой. На основании обучающей выборки строится классификатор категорий, а на тестовой выборке проверяется качество категоризации. Пусть также дано соответствие между ресурсами и категорией C в виде $\Phi: D \rightarrow \{0,1\}$, устанавливающее значение 1, в случае, если ресурс принадлежит категории и 0 – в противоположном случае [6, 7].

Используя подмножество T_r , необходимо построить функцию $\Phi': D \rightarrow \{0,1\}$, аппроксимирующую Φ так, чтобы число ошибок на T_s было наименьшим: $E = \sum_{T_s} |\Phi - \Phi'| \rightarrow \min$.

Пусть T – множество терминов, выделенное из ресурса категории C . Тогда ресурс можно представить в виде вектора $d_j = (w_{1j}, \dots, w_{|T|j})$, где $w_{ij} \in [0,1]$ – нормированный вес термина t_i в ресурсе d_j . В таком случае, категорию можно представить в виде вектора той же размерности, что и вектор ресурса: $C = (c_1, \dots, c_{|T|})$, где c_i – вес термина t_i в категории C [8].

Для получения веса термина используется частотный метод вычисления степени соответствия:

$w_{ij} = \frac{T_{i,j}}{|T_i|} \cdot \frac{|D|}{|D_j|}$, где $T_{i,j}$ – число терминов t_i в ресурсе d_j ; T_i – общее число терминов в ресурсе d_j ; D_j – число ресурсов, в которых встречается термин t_i ; D – общее количество ресурсов категории, $i \in [1, D]$, $j \in [1, T]$. Таким образом, чем чаще термин встречается на странице некоторого ресурса, но реже встречается во всех ресурсах, тем выше будет его вес в данном ресурсе.

Решение о принадлежности ресурса к категории будем принимать, если степень соответствия $CSV(c, d_j) = c \cdot d_j = \sum_i c_i d_{ij}$ достигнет некоторого порога τ . Таким образом, получаем:

$$\Phi'(c, d_j) = \begin{cases} 1, & CSV(c, d_j) \geq \tau \\ 0, & CSV(c, d_j) < \tau \end{cases}.$$

Основная проблема для данной модели – процесс обучения, заключающийся в подборе весовых коэффициентов и порога, начальное значение которого должно задаваться экспертом. Оценка качества категоризации производится с использованием метрик информационного поиска, таких, как точность, полнота и F-мера [9]. Процесс обучения и уточнения коэффициентов должен производиться регулярно в связи с увеличением количества ресурсов, относимых к категориям. Методы подбора весовых коэффициентов обладают малой вычислительной масштабируемостью, что не позволяет использовать данную модель.

Разработанная модель тематической категоризации на основе вычисления относительной значимости

В основе предложенной авторами модели категоризации лежат законы Ципфа–Мандельброта [10]. Пусть дано множество ресурсов

$D = \{d_i \mid i \in [1, M]\}$, каждый ресурс d_i с точки зрения модели представляет собой множество терминов $d_i = \{t_j \mid j \in [1, N]\}$.

Далее рассмотрим статистические величины, отражающие информационную значимость терминов в множестве ресурсов. Частота встречаемости термина t_j в ресурсе d_i :

$$DF(t_j, d_i) = \text{Log}_2 \frac{\text{count}(t_j, d_i)}{\sum_{n \in [1, N_i]} \text{count}(t_n, d_i)},$$

где $\text{count}(t_j, d_i)$ – количество вхождений термина t_j в ресурс d_i . Частота $DF(t_j, d_i)$ является вероятностью выбрать термин t_j в ресурсе d_i при случайном выборе всех вхождений терминов, имеющих в тексте ресурса.

Инверсная частота встречаемости термина в множестве ресурсов определяет количество информации, получаемое при снятии неопределенности наступления события встречи термина в одном из ресурсов множества:

$$IDF(t_j, D) = \text{Log}_2 \frac{|D|}{|d \in D \mid t_j \in d|}. \quad \text{Поскольку}$$

$$\frac{|D|}{|d \in D \mid t_j \in d|} \geq 1, \text{ то } IDF(t_j, D) \geq 0. \text{ Для часто}$$

встречающихся терминов, $IDF(t_j, D)$ близка к нулю, а для редких терминов она стремится слева к $\text{Log}_2 |D|$: $0 \leq IDF(t_j, D) \leq \text{Log}_2 |D|$.

Рассмотрим подмножество текстов $D' \subset D$, представляющее собой тематическую группу ресурсов. Пусть $d' \in D'$ и $t_j \in d'$, тогда возможно вычислить величину тематической $IDF(t_j, D')$, а разность $\Delta IDF(t_j, D, D') = IDF(t_j, D) - IDF(t_j, D')$ определяет изменение информативности термина при отнесении d' к множеству D' . Значения разности могут быть как положительными, так и отрицательными, а поскольку отнесение ресурса к тематическому множеству означает снятие информационной неопределенности относительно тематики документа, но не внесение большей неопределенности, то $\Delta IDF(t_j, D, D')$ можно записать таким образом:

$$\Delta IDF(t_j, D, D') = \begin{cases} \Delta IDF(t_j, D, D'), & \Delta IDF(t_j, D, D') > 0, \\ 0, & \Delta IDF(t_j, D, D') \leq 0 \end{cases}$$

тогда можно определить границы значений: $0 \leq \Delta IDF(t_j, D, D') \leq IDF(t_j, D)$ [11].

Согласно [10, 12] под значимостью термина t_j в ресурсе d , входящего в множество D понимается величина: $DFIDF(t_j, d, D) = DF(t_j, d) \cdot IDF(t_j, D)$. По аналогии рассмотрим $DFTIDF(t_j, d, D, D') = DF(t_j, d) \times$

$\Delta IDF(t_j, D, D')$, которая характеризует значимость t_j в ресурсе d с учетом того, что $d \subset D'$. Величину $DFTIDF(t_j, d, D, D')$ будем называть *характеристикой относительной значимости*. Поскольку $0 \leq \Delta IDF(t_j, D, D') \leq IDF(t_j, D)$, то $DFTIDF(t_j, d, D, D') \leq DFIDF(t_j, d, D)$.

Пусть задано множество категорий $C = \{c_k \mid k \in [1, N]\}$. Каждая категория представляет собой множество терминов $c_k = \{t_j\}$. Введем метакатегорию терминов, содержащихся во всех категориях $C' = \bigcup_{k \in [1, N]} c_k$. На этапе обучения для всех терминов должны быть рассчитаны $IDF(t_j, C')$ и $\Delta IDF(t_j, c_k, C')$.

Тогда мы можем вычислить суммарную относительную значимость терминов, содержащихся в ресурсе d по отношению к категории c_k : $S(d, c_k, C') = \sum_{t \in c_k \cap d} DFTIDF(t, d, c_k, C')$. Учитывая,

что документ может не содержать все термины категории, можем записать нормированный вариант $SN(d, c_k, C') = \frac{S(d, c_k, C')}{\sum_{t \in d} DFIDF(t, d, C')}$, $0 \leq SN(d,$

$c_k, C') \leq 1$. Последнее соотношение позволяет использовать нормированную относительную значимость для принятия решения о категоризации ресурса: ресурс d относится к категории c_k тогда и только тогда, когда $SN(d, c_k, C') > \tau$, где τ – пороговое значение, задаваемое экспертом, либо определяемое автоматически в процессе обучения.

Научная новизна и практическая ценность предложенной модели заключается в следующем.

- Модель базируется на законах Ципфа–Мандельброта, которые инвариантны языку категоризируемых ресурсов.

- Модель предполагает практически полную автоматизацию процесса категоризации. Для обучения и работы системы требуется только множество категорий и обучающая выборка ресурсов для установки значения порога.

- Оценку качества категоризации можно осуществлять при помощи метрик информационного поиска, таких, как точность и полнота [9]. Вычисляя метрики, можно устанавливать оптимальное значение порога, которое может быть различным: в некоторых случаях потребность в доступе наиболее важна, поэтому допустимы ложные срабатывания, т. е. полнота важнее точности. В случаях жесткого ограничения доступа точность важнее полноты.

Процедура категоризации имеет линейную сложность, трудоемкость линейно зависит от количества категорий и терминов. Это позволяет говорить о высокой скорости категоризации, что в свою очередь дает возможность рассматривать предложенную модель как универсальную: категоризация может производиться как на выделенном сервере, так и на локальных машинах пользователей.

Принципы работы URL-фильтра

При неуправляемом доступе к ресурсам Интернет запрос от пользователя локальной сети транслируется через точку доступа в сеть Интернет к любому ресурсу, и пользователь получает запрашиваемую информацию.

Если включить в цепочку систему контентной фильтрации, то перед исполнением запроса ресурс будет проверяться на принадлежность к конкретной категории, и, в случае запрещенной категории, запрос к ресурсу будет заблокирован.

Если пользователь запрашивает доступ к ресурсу, не определенному в системе контентной фильтрации, то запрос будет одобрен. Но одновременно СКФ запустит процесс категоризации нового ресурса. И если этот ресурс будет определен как нежелательный, то следующий запрос к тому же ресурсу будет заблокирован.

Архитектурные решения

Система представляет собой комплекс взаимодействующих между собой функциональных компонент: сервиса поддержки клиентов (СПК) и локального контентного фильтра (ЛКФ) который состоит из сервиса поддержки клиентской сети (ЛКФ-СПКС), управляющего модуля ЛКФ-УМ и интеграционного модуля ЛКФ-ИМ. Общая схема взаимодействий компонентов представлена на рис. 2.

СПК – центральный сервер системы, состоящий из ядра и двух пользовательских интерфейсов, организованных как «Сайт администратора СКФ» и «Сайт поддержки пользователей СКФ» (СПК-СПП).

Ядро СПК обеспечивает:

работу с категоризованными и некатегоризованными ресурсами и сбор статистики с ЛКФ. Эта часть ядра должна быть реализована на опорных серверах фильтрации (СПК-ОСФ);

ведение базы данных клиентов СКФ;

ведение статистики работы клиентов СКФ.

Сайт администратора СПК обеспечивает администратору СПК управление базой данных клиентов СКФ. Сайт поддержки пользователей СКФ (СПК-СПП) обеспечивает предоставление администраторам клиентов статистической информации о работе пользователей в соответствующих клиентских сетях.

Компоненты ЛКФ: СПКС, УМ и ИМ устанавливаются в каждой клиентской сети и обеспечивают для пользователей функциональность контекстной фильтрации. Все эти компоненты могут быть установлены на одном компьютере или на различных компьютерах сети и использовать общую базу данных.

Управляющий модуль ЛКФ отвечает за принятие решения о разрешении доступа к сетевому ресурсу для пользователя клиентской сети.

Модуль должен выполнять следующие функции:

отвечать на запросы интеграционного модуля о праве пользователя клиентской сети на запрос к некоторому сетевому ресурсу (решение принимается на основании информации о принадлежности ресурса к той или иной категории и политики установленной для пользователя);

сохранять статистику запросов в хранилище данных.

Сервис поддержки клиентской сети представляет собой приложение, используемое администратором клиентской сети ЛКФ.

ЛКФ-СПКС должен выполнять следующие функции:

создание и изменение политик (расписаний, прав на просмотр ресурсов определенных категорий) для пользователей;

предоставление статистики работы пользователей сети.

Интеграционный модуль должен выполнять следующие задачи:

перехват запросов к сетевым ресурсам по протоколу НТТР;

аутентификацию пользователя;

выполнение запроса на разрешение доступа к ЛКФ-УМ;

блокировку запрещенных ресурсов.

Практические результаты

СКФ предоставляет обширные возможности для настройки правил фильтрации:

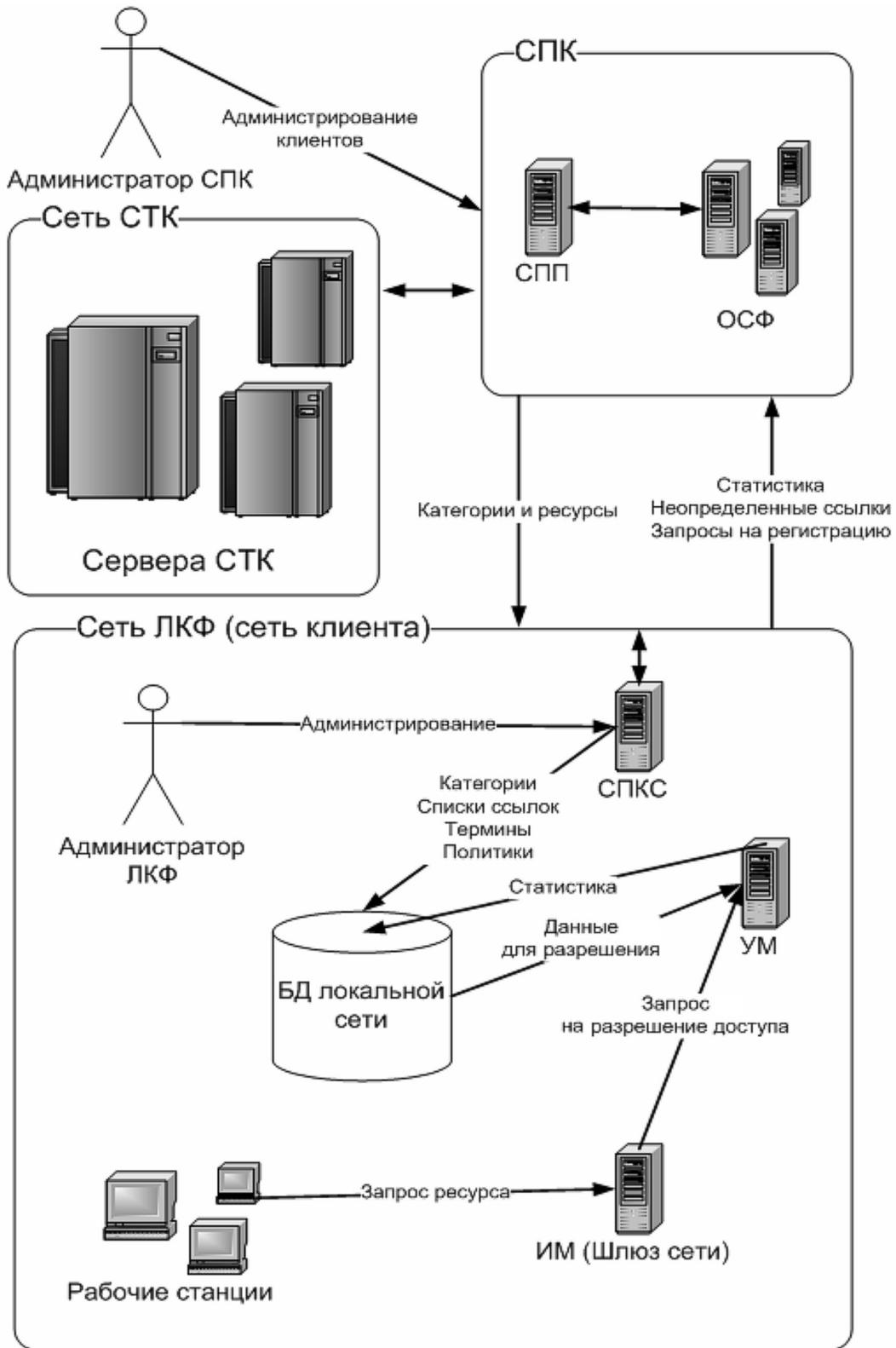


Рис. 2. Взаимодействие компонентов СКФ

настройка правил доступа для отдельного пользователя или групп пользователей;

управление доступом к ресурсам на уровне категорий и отдельных сайтов; «черные» и «белые» списки;

календарь применения правил доступа;

регулируемый уровень управления доступом: мониторинг, предупреждение о запросе к опасному ресурсу, блокирование опасного ресурса.

Перечислим некоторые другие наиболее важные функциональные особенности СКФ:

наравне со способностью обрабатывать русскоязычные данные, СКФ работает с другими основными языками мира;

система отчетности о работе пользователей позволяет получить детальную статистику об использовании Интернет;

автоматическое обновление базы URL и терминов обеспечивает своевременное обновление базы СКФ и качественную, согласованную работу всех установленных копий системы;

подсистема регистрации и авторизации исключает нелегальное использование клиентской части системы фильтрации и доступ к базе данных категоризированных Интернет-ресурсов.

Локальная система фильтрации разработана с применением технологии СОМ, широко использует преимущества и возможности, предоставляемые данной платформой.

В ходе работы рассмотрены основные принципы контентной фильтрации и определены наиболее перспективные методики.

При изучении существующих контентных фильтров не были обнаружены реализации, архитектура которых позволяла бы использовать их как шлюзовые фильтры и как фильтры на машинах, не подключенных к локальным сетям, а использующих модемное соединение для работы в сети Интернет. Также были обнаружены разнообразные проблемы при работе с русским языком и сбором статистики. Многие системы применяют устаревшие и малоэффективные методы фильтрации.

Поэтому можно говорить о том, что на данный момент разработанная система не имеет аналогов для русскоязычного сегмента сети Интернет.

Описываемые работы проводились по проекту «Разработка и апробация в пилотных субъектах Российской Федерации пакета свободного программного обеспечения для использования в общеобразовательных учреждениях Российской Федерации», проводимому в рамках мероприятия «Внедрение современных образовательных технологий» приоритетного национального проекта «Образование». Система контентной фильтрации Интернет-ресурсов вошла в Стандартный базовый пакет лицензионного программного обеспечения (СБППО) для образовательных учреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

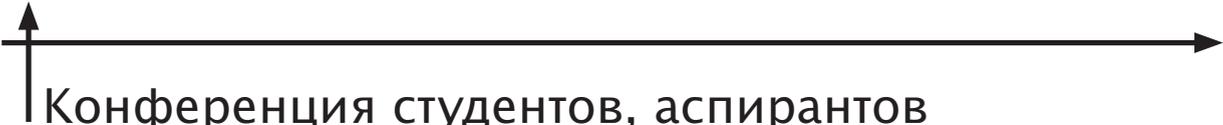
1. Некрестьянов, И.С. Обнаружение структурного подобия HTML-документов [Текст]/ И.С. Некрестьянов, Е.Ю. Павлова//Тр. IV Всерос. конф. RCDL'2002.–Дубна, 2002.–С. 38–54;
2. Добров, Б.В. Формирование базы терминологических словосочетаний по текстам предметной области [Текст]/Б.В. Добров, Н.В. Лукашевич, С.В. Сыромятников//Тр. V Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2003.–СПб., 2003.
3. Загоруйко, Н.Г. На пути к автоматическому построению онтологии [Электронный ресурс]/Н.Г. Загоруйко, А.М. Налетов, И.М. Гребенкин <http://www.dialog-21.ru/Archive/2003/Zagorujko.htm>
4. Захарова, И.В. Об одном подходе к реализации семантического поиска документов в электронных библиотеках [Текст] /И.В. Захарова//Вестник УГАТУ. Сер.Управление, вычислительная техника и информатика.–2009.–Т. 12.–№ 1(30).–С. 133–138.
5. Website of POESIA Project [Электронный ресурс] <http://www.poesia-filter.org/>
6. Поляков, И.Е. Опыт создания системы фильтрации агрессивного web-контента [Текст]/И.Е. Поляков// Тр. XII Всерос. науч.-метод. конф. «Телематика 2005», 6-9 июня 2005. –Изд-во СПБИТМО.
7. Sebastiani, F. Machine Learning in Automated Text Categorization [Электронный ресурс]/F. Sebastiani// <http://nmis.isti.cnr.it/sebastiani/>
8. Свечников, С.В. Высокореlevantный поиск и автоматическая категоризация ресурсов Интернета [Текст]/С.В. Свечников//Сб. «Интернет-порталы: содержание и технологии». –Вып. 4. –ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика».–М.: Просвещение, 2007.–С. 538–548;
9. Поляков, П.Ю. RCO на РОМИП 2006 [Текст]/ П.Ю. Поляков, В.В. Плешко//Тр. IV семинара по оценке методов информационного поиска.–СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2003.–С. 72–79.

10. **Попов, А.** Поиск в Интернете – внутри и снаружи [Электронный ресурс]/А. Попов//http://www.citforum.ru/pp/search_03.shtml

11. **Тихомиров, И.А.** Метод динамической контентной фильтрации сетевого трафика на основе анализа текстов на естественном языке [Текст]/И.А. Тихоми-

ров//Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. 2008.–Вып. 2. –Т. 6.–Новосибирск: НГУ.–С. 94–100;

12. **Нан, Е.** Text Categorization Using Weight Adjusted k-Nearest Neighbor Classification[Текст]/E. Nan, G. Karypis, V. Kumar//Proc. of the 16th International conf. on Machine Learning. –Denver.–1999.–P. 41–56.



Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»

Начиная с 2004 года факультет технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета проводит конференцию студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». Цели конференции – подготовка участников к будущей работе в профессиональных программистских коллективах, создающих программный продукт высокого качества, поддержка изучения современных информационных технологий и инструментальных средств в соответствии с мировыми стандартами и действующими международными сертификационными требованиями, а также выявление талантливых молодых специалистов в области разработки и использования программных систем.

Особенность конференции заключается в том, что участник должен проявить свои знания и умения не столько в области программирования различных математических головоломок, сколько в области разработки и использования программных продуктов и систем в условиях, максимально приближенных к реальным процессам проектирования и разработки современных систем различной степени сложности

Конференция проводится в три этапа: на первом отбираются и ревьюируются работы участников, присылающих короткие статьи – заявки на участие. На их основе отбираются приглашенные докладчики на второй этап. Присланные статьи публикуются в сборнике материалов конференции. Второй этап проходит в виде докладов и демонстраций на секциях.

Результатом является отбор 10–12 докладов на первый этап. Все участники секционных презентаций награждаются дипломами третьей степени. Отобранные участники первого этапа разыгрывают дипломы первой и второй степени. Решение о премировании участников конкурса принимает конкурсная комиссия, в которую входят руководители секций и представители организаций спонсоров.

В 2010 году спонсорами конференции выступают всемирно известная компания Microsoft и факультет технической кибернетики СПбГУ.

В данном журнале публикуется девять статей победителей – участников конференции 2010 года. Их тематика соответствует тематике трех секций: Программные продукты и системы (статьи 2, 5, 7, 9); Применение перспективных методов и технологий разработки программного обеспечения (статьи 1, 4, 6); Перспективные методы и алгоритмы теории программирования (статьи 3, 8). Публикуемые работы отличает инновационный характер, ориентация на реализацию полученных результатов, широкое применение технологий MS при создании программного обеспечения и документации.

Декан ФТК, профессор,
доктор технических наук

И.Г. Чернуцкий

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВ КОМПИЛЯТОРА C# С ПОМОЩЬЮ MICROSOFT PHOENIX

Компиляцию кода .NET-совместимых языков, к которым относится C#, можно разделить на два этапа. Каждый этап представляет собой отдельный компилятор. Первый этап компиляции, который инициирует программист в процессе разработки программы, преобразует код на исходном языке в код на специальном платформо-независимом языке MSIL (Microsoft Intermediate Language). Будем называть его MSIL-компилятор. Второй этап компиляции, – JIT (Just In Time)-компилятор, – выполняет виртуальная машина .NET непосредственно в момент выполнения программы, преобразуя код, полученный на первом этапе, в набор машинных инструкций.

На данный момент наиболее известны следующие компиляторы языка C#: Microsoft Visual C# и Mono.

Одной из отличительных черт компиляторов является фаза оптимизации, поскольку она определяет качество целевого кода. Существует множество возможных этапов оптимизации, способных определенным образом улучшить целевой код программы.

Оптимизация кода для .NET-совместимых языков может выполняться на обоих указанных этапах. Оптимизация на первом этапе зависит от компилятора, однако, вследствие специфики языка MSIL, она ограничивается применением платформо-независимых алгоритмов. Оптимизация на стадии JIT-компиляции определяется виртуальной машиной .NET.

Хотя фаза оптимизации в MSIL-компиляторе компании Microsoft недостаточно документирована, тем не менее, опытным путем удалось установить, что этот компилятор выполняет на первом этапе лишь наиболее простые оптимизации – свертку констант и устранение «мертвого» кода, предоставляя всю основную работу по оптимизации программы JIT-компилятору.

В документации Mono указано, что на этапе MSIL-компиляции, аналогично компилятору Microsoft Visual C#, выполняется свертка констант и устранение «мертвого» кода.

Цель данной работы – разработка агрессивно оптимизирующего MSIL-компилятора языка C#, т. е. компилятора, выполняющего максимально возможный объем платформу-независимых оптимизаций на первом этапе компиляции. Такой компилятор может привести к более эффективному выполнению целевой программы по нескольким причинам. Во-первых, итоговый PE-файл может иметь меньший объем, что позволяет быстрее прочитать его с диска. Во-вторых, JIT-компиляция может выполняться быстрее вследствие отсутствия необходимости выполнения некоторых оптимизаций.

Для создания компилятора был использован инструмент Microsoft Phoenix [1], являющийся новейшим средством для разработки компиляторов и приложений для анализа, оптимизации и тестирования программ. Эта система позволила существенно упростить создание компилятора, путем разработки полноценного внутреннего представления кода программы и автоматизации фазы генерации кода.

Фазы компилятора. Концептуально компилятор работает пофазно, причем в процессе каждой фазы происходит преобразование исходной программы из одного представления в другое. Основные фазы компилятора показаны на рис. 1.

Лексический и синтаксический анализ. Основные задачи лексического и синтаксического анализа:

- распознавание входного потока символов;
- построение абстрактного синтаксического дерева;
- обнаружение лексических и синтаксических ошибок.

Для упрощения создания лексического и синтаксического анализаторов автором статьи был использован генератор синтаксических анализаторов ANTLR [2]. Важная отличительная черта ANTLR – возможность генерации кода на .NET-совместимых языках, в частности, на языке C#. Эта возможность позволила сократить количество промежуточных состояний компилятора



Рис. 1. Фазы работы компилятора

и полностью реализовать компилятор на языке C#. Кроме того, ANTLR генерирует модуль LL-разбора входной грамматики, что позволяет легко отлаживать сгенерированный код.

После выявления ошибок ANTLR использует встроенный алгоритм восстановления. При возникновении ошибки этот алгоритм пытается добавить один пропущенный символ (лексему) из входного потока или удалить один лишний символ. Если такое преобразование позволяет «исправить» входной поток, разбор продолжается. Иначе входные символы пропускаются до следующего «синхронизирующего» символа.

Семантический анализ. Семантический анализ осуществляется над абстрактным синтаксическим деревом, полученным от ANTLR. На этом этапе каждый элемент (узел) дерева дополняется различными атрибутами, описывающими семантику языка. Для этого производится несколько обходов дерева, каждый из которых вычисляет определенный набор атрибутов.

В качестве примера такого обхода можно привести вычисление типов. Оно выполняется для всех узлов дерева, являющихся выражениями. Для каждого такого узла выводится тип выражения на основе типов его аргументов, в соответствии с семантическими правилами языка. Если выведенный тип выражения не совпадает с ожидаемым типом, производится вставка нового узла дерева, представляющего собой неявное преобразование (cast) выведенного типа в ожидаемый. Если такое преобразование невозможно, пользователю выдается семантическая ошибка.

Примером такого неявного преобразования может служить специфичная для C# пара преобразований boxing/unboxing. Это преобразование позволяет использовать типы, передающиеся по значению (например, структуры или примитивные типы) в контексте, где используются ссылочные типы (например, классы).

Каждый обход дерева семантического анализа на основе вычисленных атрибутов выполняет проверку семантических ошибок.

Генерация промежуточного кода. Наличие фазы генерации промежуточного кода зависит от реализации компилятора. Обычно промежуточное представление имеет форму некоторого внутреннего языка компилятора. Чем универсальнее этот язык, тем больше целевых языков можно из него синтезировать.

Microsoft Phoenix в качестве промежуточного кода использует Phoenix Intermediate Representation (IR), который представляет собой ключевое понятие Microsoft Phoenix и является фундаментальным представлением семантики программы. Phoenix IR предоставляет набор фабрик классов для создания полноценного универсального внутреннего представления абстрактного синтаксического дерева.

Phoenix IR является многоуровневым. Существует четыре уровня абстракции:

HIR (High-level IR) – представление высшего уровня;

MIR (Mid-level IR) – представление среднего уровня;

LIR (Low-level IR) – представление нижнего уровня;

EIR (Encoded IR) – представление уровня машинного кода.

Каждое представление имеет преимущества и недостатки, определяемые их архитектурой. Они определяют целевое использование этого представления. Так, например, HIR, представляющее собой аналог абстрактного синтаксического дерева, удобно для построения внутреннего представления, однако оно не подходит для выполнения большинства оптимизаций.

Процесс работы Microsoft Phoenix состоит из нескольких этапов, называемых «фазами» (Phases). Каждая фаза выполняет определенный набор

действий над внутренним представлением дерева. Среди различных фаз существуют фазы для изменения уровня внутреннего представления.

Оптимизация кода. Оптимизация кода изменяет производительность целевого кода программы, созданной компилятором. Термин «оптимизация», на наш взгляд, является не вполне точным, поскольку оптимизация редко приводит к оптимальному коду. Обычно оптимизация позволяет улучшить (иногда – существенно) производительность целевой программы, однако, в некоторых случаях, она может не изменить или даже ухудшить производительность. На самом деле, чаще всего фактически не существует возможности определить, улучшает (или, хотя бы, не ухудшает ли) конкретная оптимизация производительность конкретной программы или нет, поскольку выполнение программы зависит от множества факторов, таких, как архитектура компьютера или операционная система. Например, некоторая простая оптимизация, изменив порядок загрузки данных в кэш процессора, может привести к образованию или устранению лишних «кэш-промахов» на разных архитектурах, приводя, соответственно, к уменьшению или увеличению производительности программы. Кроме того, выполнение программы чаще всего зависит от входных аргументов. При некотором наборе входных аргументов программа может пропустить оптимизированный участок кода, т. е. оптимизация никак не повлияет на скорость выполнения программы.

Существует два критерия для определения влияния оптимизации на производительность программы: размер кода и скорость выполнения кода. Чем меньше размер кода, тем меньше операций чтения с диска необходимо для его загрузки в память, и меньше памяти необходимо для выполнения этого кода. Чем больше скорость выполнения кода программы, тем больше общая производительность программы. Для многих оптимизаций увеличение скорости выполнения влечет за собой и уменьшение размера кода. Однако существуют оптимизации, такие, например, как развертка циклов, которые, при увеличении скорости приводят к увеличению объема кода, что может плохо отразиться, например, на скорости работы кэша процессора.

В рамках данной статьи автор реализовал оптимизации, улучшающие производительность программы по обоим критериям, поскольку вы-

полнение оптимизаций, увеличивающих размер кода программы, может наложить дополнительные затраты на JIT-компилятор. Практичность их применения на стадии MSIL-компилятора сомнительна и требует отдельного изучения. Автор планирует в дальнейшем реализовать их и исследовать их возможное влияние на общую скорость работы программы.

Главное правило оптимизации заключается в том, что она не должна изменять поведение программы. То есть оптимизация должна быть «безопасной». Если, например, в цикле выполняется инвариантное присваивание $x=y/z$, можно было бы вынести его из цикла и выполнить его, таким образом, только один раз. Однако такая оптимизация может изменить поведение программы, т. к., если $z = 0$, а цикл ни разу не выполнится, оптимизированный вариант программы сгенерирует исключение, в то время как неоптимизированный вариант отработает нормально.

Основная часть оптимизаций выполняется на промежуточном внутреннем представлении MIR. Каждая оптимизация представляет собой отдельную «фазу» работы Microsoft Phoenix.

Формально оптимизации можно разделить на два типа: процедурные и межпроцедурные. Единичей процедурных оптимизаций является процедура, в то время как межпроцедурные оптимизации рассматривают всю программу в целом.

Для осуществления процедурных оптимизаций необходима информация о потоке управления программы и манипуляциях, проводимых над данными. Для удобного представления этой информации используется граф потоков (Flow Graph). Граф потоков разделяет код процедуры на блоки. Каждый блок представляет собой прямолинейный участок кода, который можно выполнить только последовательно с первой до последней команды, входящих в него. То есть блок не имеет внутри условных переходов и циклов. Ребро из блока A в блок B существует тогда и только тогда, когда существует набор входных параметров процедуры, при котором после последней инструкции блока A выполнится первая инструкция блока B . Таким образом, граф потоков представляет собой ориентированный граф, в котором узлами являются блоки, а ребрами – возможные переходы между блоками.

Пример графа потоков представлен на рис. 2.

Ниже кратко опишем применяемые оптимизации.

```

public int f(int x)
{
    int a = 2;
    int b = 2;
    int c = 0;
    if (x > 5)
    {
        c = a + b;
    }
    else
    {
        c = a · b;
    }
    return c;
}

```

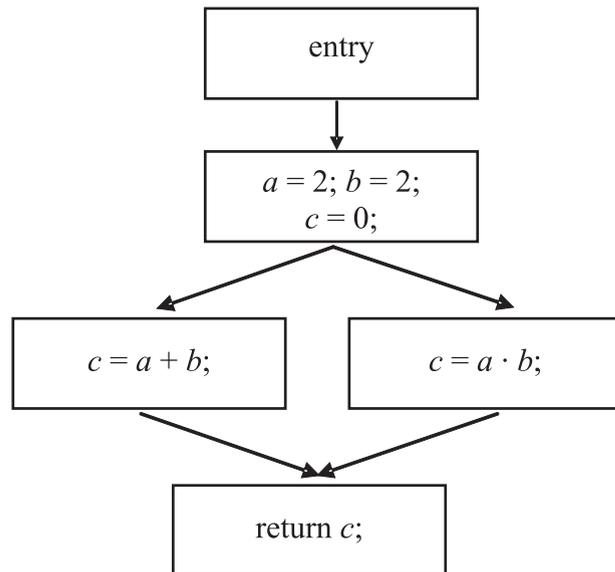


Рис. 2. Пример графа потоков для процедуры

Свертка констант (Constant Folding) – самая простая оптимизация. Во время компиляции она вычисляет выражения, аргументы которых являются константами. Таким образом, например, выражение 2×2 заменяется на константу 4. Эта оптимизация является вспомогательной и выполняется каждый раз при необходимости.

Оптимизация алгебраических упрощений (Algebraic Simplification) использует различные алгебраические правила и свойства для уменьшения количества операций в выражении. Например, выражение $a + 0$ заменяется на a . Эта оптимизация, аналогично предыдущей, – вспомогательная, вызывается каждый раз при необходимости.

Перечисление значений (Value Numbering) позволяет определить, что два вычисления являются эквивалентными, и удалить одно из них. В результате применения этой оптимизации пара инструкций $a = x+1; b = x+1$ заменится на $a = x+1; b = a$.

Распространение копий (Copy Propagation) представляет собой трансформацию, которая при наличии инструкции $x = y$ заменяет дальнейшие использования x на y . Эта оптимизация выполняется в два этапа. Сначала для каждого блока графа потоков выполняется локальная оптимизация, затем выполняется глобальная оптимизация для всей процедуры.

Распространение констант (Constant Propagation) при наличии инструкции $x = c$, где x – переменная, а c – константа, заменяет все ис-

пользования x на c , пока переменной x не будет присвоено новое значение.

Сокращение избыточности (Partial-Redundancy Elimination) представляет собой оптимизацию, которая вставляет и удаляет выражения таким образом, чтобы каждый путь в графе потоков имел наименьшее возможное количество одинаковых выражений. Частными случаями этой оптимизации являются выделение общих подвыражений (Common-Subexpression Elimination) и вынос констант за пределы цикла (Loop-Invariant Code Motion). Эта оптимизация может несколько увеличить размер кода программы, однако обычно это увеличение несущественно.

Устранение недостижимого кода (Unreachable-Code Elimination) удаляет код, который никогда не выполняется.

Упрощение условных переходов (If Simplifications) удаляет условные переходы, зависящие от констант, а также упрощает условные переходы, не имеющие инструкций в одной из своих веток.

Упрощение циклов (Loop Simplifications) удаляет пустые циклы, если вычисление его условий не имеет побочных действий.

Устранение «мертвого» кода (Dead-Code Elimination) удаляет все переменные и инструкции, не влияющие на результат работы процедуры или какие-либо внешние объекты.

Вставка процедур (Procedure Integration) позволяет заменить вызов функции ее непосред-

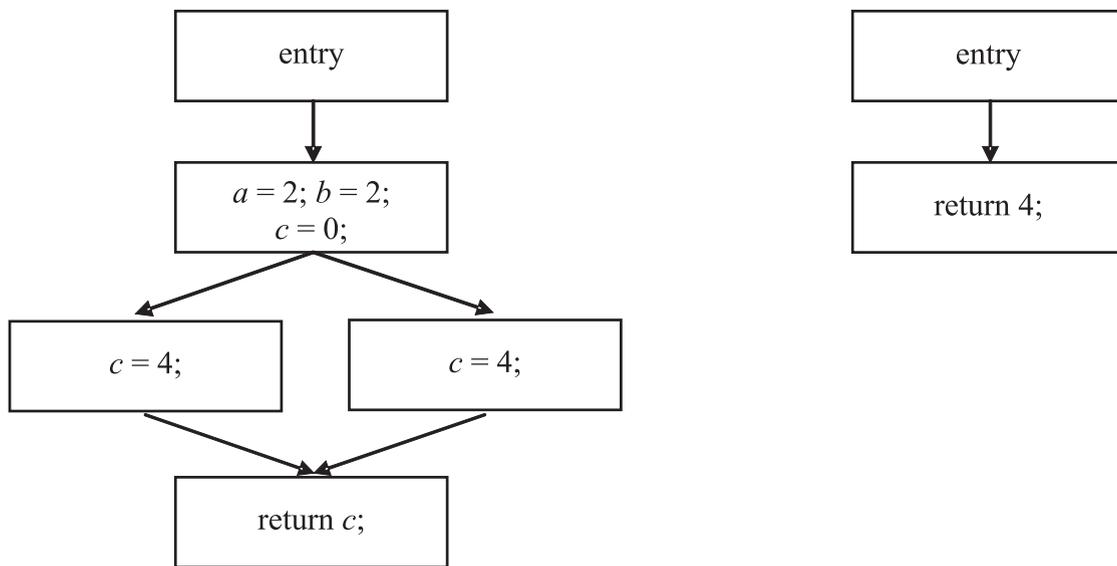


Рис. 3. Применение оптимизаций

ственным кодом. На данный момент реализована вставка процедур, имеющих небольшое количество инструкций, сравнимое с количеством входных аргументов, поскольку интеграция таких процедур не увеличит размер кода программы.

На рис. 3 показано последовательное применение оптимизаций к графу потоков.

Сначала выполняется распространение констант, которое заменит использование переменных a и b на константу 2, после которого вызовется вспомогательная оптимизация свертки констант. При этом граф потоков примет вид, указанный на рис. 3, слева. Затем опять отработает распространение констант: удалит инструкции из ветвей условного перехода. После этого отработает оптимизация по упрощению условных переходов: удалит его, т. к. обе его ветки пусты. Далее выполнится устранение «мертвого» кода: удалит инструкции в верхнем блоке, после чего граф потоков примет вид, указанный на рис. 3, справа. Теперь везде, где будет использоваться функция f , будет применена оптимизация вставки процедур, которая заменит ее использование на константу 4. Данный пример демонстрирует, что результат выполнения конкретной оптимизации существенно зависит от результатов выполнения других оптимизаций. Таким образом, результирующий код программы зависит не только от набора проведенных оптимизаций, но и от порядка их выполнения.

В итоге, код для функции f , полученный на выходе разработанного компилятора, состоит из двух строк, в то время как код этой же функции на выходе компилятора Microsoft Visual C# состоит из 16 строк.

Генерация кода. Генерация кода представляет собой заключительную фазу работы Microsoft Phoenix. При этом, на основе внутреннего представления создается PE-файл, частью которого является MSIL-код программы.

В представленной работе реализована основная часть оптимизаций, увеличивающих скорость выполнения программы, но не увеличивающих размер кода программы. Выполнение этих оптимизаций на стадии MSIL- компилятора дает некоторый прирост производительности программы в сравнении с компилятором Microsoft Visual C#. В дальнейшем планируется реализация оптимизаций, увеличивающих размер кода, и исследование влияния таких оптимизаций на скорость работы JIT-компилятора и программы в целом.

Кроме того, на данный момент поддержан не весь синтаксис языка C#. В текущей версии программы не поддерживаются делегаты и обобщения (шаблоны). В качестве возможного варианта развития проекта также рассматривается создание GUI-оболочки для компилятора, либо интеграция компилятора в Microsoft Visual Studio.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microsoft Phoenix [Электронный ресурс] <http://connect.microsoft.com/Phoenix>
2. ANTLR Parser Generator [Электронный ресурс] <http://www.antlr.org>
3. Aho, A.V. Compilers: Principles, Techniques & Tools [Текст]/A.V.Aho, M.S.Lam, R.Sethi, J.D.Ullman; 2ed.—Addison-Wesley, 2007.
4. Muchnick, Steven S. Advanced Compiler Design & Implementation [Текст]/Steven S. Muchnick.—Morgan Kaufmann Publishers, 1997
5. ECMA International [Электронный ресурс] <http://www.ecma-international.org/>

УДК 004.415.5

*Н.В. Воинов, В.П. Котляров***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭВРИСТИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЕВ**

Стоимость исправления ошибок на фазах жизненного цикла создания программного продукта экспоненциально растет [1]. Фаза разработки требований и спецификаций наиболее эффективна для идентификации и исправления ошибок [2]. Следовательно, предотвращение ошибок в требованиях и обнаружение их на ранних этапах проекта сильно уменьшает объем корректировок продукта и, таким образом, сокращает общую стоимость разработки ПО.

Решением может служить подход тестирования на основе модели (model based testing). В голове разработчика и тестировщика всегда присутствует та или иная «модель» устройства программы, а также «модель» ее желаемого поведения, исходя из которой, в частности, составляются списки проверяемых свойств и создаются соответствующие тестовые примеры.

Модель – некоторое отражение структуры и поведения системы. Модель может описываться в терминах состояния системы, входных воздействий на нее, конечных состояний, потоков данных и потоков управления, возвращаемых системой результатов и т. д. Анализируя модель разрабатываемой системы, можно еще до этапа кодирования найти различного рода некорректности, неполноту, недетерминированное поведение (и, таким образом, избежать их в реализации), а также изучить возможные сценарии поведения, на основе которых можно получить тесты. Модель строится в виде формальных спецификаций на некотором формальном языке.

В случае систем крупного размера возникает проблема, связанная с комбинаторным взрывом числа состояний модели. Обычно состояние проверяемой модели включает большое количество переменных и процессов. Даже если число процессов конечно и переменные могут принимать только конечное число значений, общее число состояний может быть очень большим. Например, в системах, использующих параллелизм, число состояний моделей растет экспоненциально. В результате возникает необходимость оптимизации обхода формальной модели для последующей генерации тестовых сценариев. Кроме того, необходимо из множества возможных тестовых сценариев выбирать их некоторый оптимальный набор, который удовлетворяет определенному критерию покрытия требований.

В данной статье описан метод эвристик, позволяющий управлять ходом генерации тестовых сценариев (трасс) по формальной модели системы, представленной в виде базовых протоколов [3], а также сформулирован критерий покрытия требований, в соответствии с которым определяется оптимальный набор тестовых сценариев, по которым впоследствии будут генерироваться исполняемые тесты. Представлены результаты применения метода эвристик и оптимизации количества тестовых сценариев.

Базовые протоколы. Базовый протокол является формальной записью утверждения о некоторых событиях, которые должны произойти в про-

грамме, алгоритме, протоколе при выполнении определенных условий. Например, пусть имеется следующее требование к системе телефонии: «если система находится в состоянии busy, то после возврата трубки на базу она должна перейти в состояние idle». В данном утверждении можно выделить три составляющих: предусловие – «если система находится в состоянии busy»; процессная составляющая – «возврат трубки на базу» и постусловие – «система перейдет в состояние idle».

В общем случае базовый протокол является тройкой Хоара [4] и имеет следующий вид: $\alpha \xrightarrow{\mu} \beta$, где α и β – предусловие и постусловие соответственно; μ – процессная составляющая базового протокола. Условия α и β задаются с помощью логических выражений некоторого базового языка и определяют условия на множестве состояний модели.

Разные базовые протоколы могут склеиваться по пред- и постусловиям, если состояние, описанное в постусловии одного базового протокола, совпадает с состоянием, описанным в предусловии другого. Таким образом, изолированно заданные поведенческие свойства образуют граф поведения модели, который и обходит верификатор.

Метод эвристик. Как было сказано выше, современные программные системы, особенно

в телекоммуникационной сфере, имеют очень большие размеры и сложную структуру и, как следствие, по формальным моделям, представляющим эти системы, практически невозможно вручную проанализировать все их поведение. Существуют инструменты верификации, которые в автоматическом режиме проверяют модели на корректность и могут по моделям генерировать некоторые сценарии их поведения (например, примеры тупиков в модели, недетерминированного поведения, заикливания и т. д.). Однако для целей тестирования часто требуется по модели построить определенное количество сценариев, покрывающих конкретные функциональные требования, интересующие заказчика, чтобы в дальнейшем сгенерировать по ним тесты и исполнить их на готовой реализации системы. Метод эвристик позволяет пользователю задавать критерии покрытия, которые будут одновременно служить направлением поиска трасс для тестовых сценариев при обходе пространства поведения модели. Метод подразумевает наложение ограничений на размер тестового сценария, что дает возможность проверить его допустимость. Критерии покрытия формулируют дополнительные ограничения на поиск, отсекая ветви поведения модели, не удовлетворяющие тестовому сценарию.

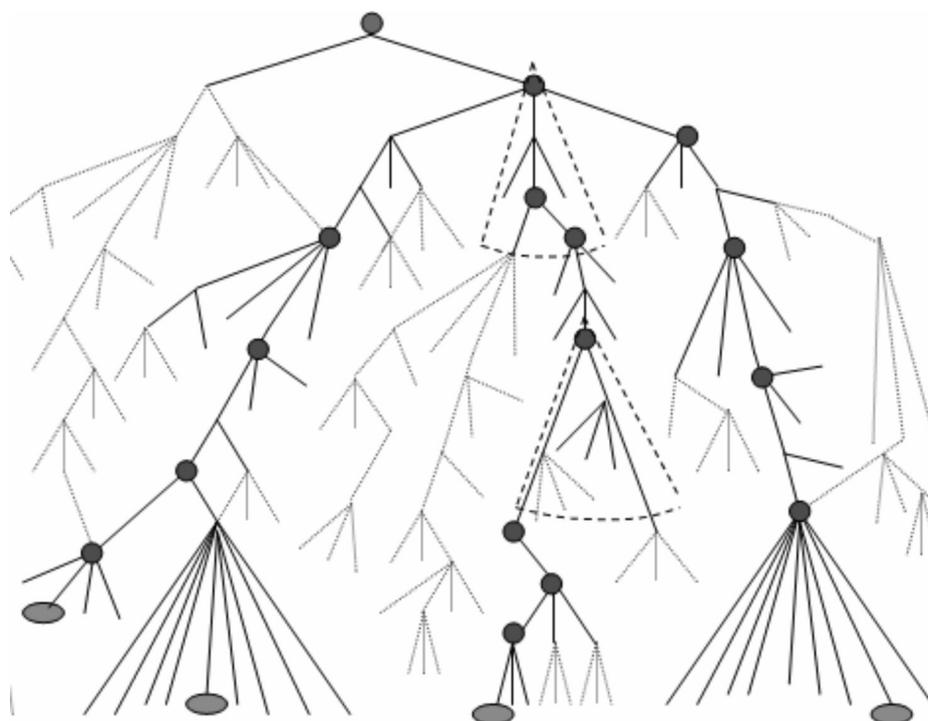


Рис. 1. Схема работы метода эвристик

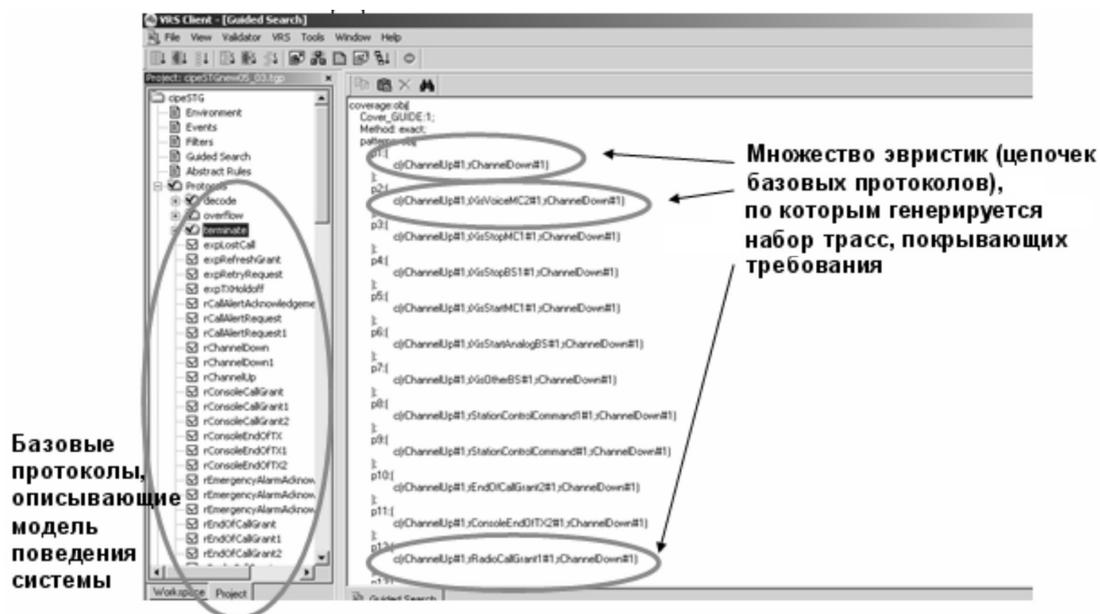


Рис. 2. Пример задания эвристик в системе VRS

Основная идея метода эвристик схематически представлена на рис. 1, где изображено дерево поведения модели, построенное на основании множества базовых протоколов, описывающих модель (вершины – состояния модели, переходы – базовые протоколы).

Пользователь, зная, какие именно элементы дерева поведения модели (какие сигналы, изменения атрибутов и состояний и т. д.) должны быть включены в тестовый сценарий, чтобы соответствующее требование было покрыто, может указать определенные состояния и переходы, т. е. задать промежуточные точки (отмечены кружками), через которые осуществляется трассовая генерация. Таким образом, существенно ограничивается пространство поиска от одной промежуточной цели до другой, т. е. от одного события в тестовом сценарии до другого. При необходимости путь от начального события до конечного может быть уточнен дополнительными событиями, конкретизирующими путь в древе поведения (рис. 1).

Для реализации метода эвристик использовалась система верификации VRS (Verification of Requirement Specifications) [5]. VRS-технология была создана совместно Институтом кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины и компанией Motorola для верификации функциональных поведенческих спецификаций, описанных с помощью базовых протоколов. Она проверяет модели, извлекаемые из базовых протоколов, на

недетерминированное поведение, достижимость определенных состояний, а также на полноту и непротиворечивость. После сеанса верификации составляется верификационный отчет с указанием ошибок, неточностей и несоответствий, найденных в процессе верификации. К отчету прилагаются полученные трассы, описывающие некорректные поведения системы.

В качестве промежуточных целей, которые обходит трассовый генератор VRS, использовались имена базовых протоколов. Последовательность базовых протоколов, достаточная для покрытия требования, называется «цепочкой». По каждой цепочке автоматически генерируется трасса, покрывающая определенное требование. На рис. 2 представлен пример задания эвристик (цепочек базовых протоколов) в одном из проектов VRS.

Использование метода эвристик позволяет значительно сократить время на генерацию тестовых сценариев, покрывающих определенный набор требований. В табл. 1 приведены результаты применения метода в трех крупных телекоммуникационных проектах. По результатам можно сделать вывод о том, что время, затрачиваемое верификатором на автоматическую проверку корректности модели и генерацию всех возможных сценариев поведения модели (3-я колонка) значительно превосходит время на генерацию с помощью метода эвристик конкретных тестовых сценариев, покрывающих требования.

Таблица 1

Результаты применения метода в телекоммуникационных проектах

Количество базовых протоколов в проекте	Количество требований в проекте	Время обхода всей модели верификатором и трассовым генератором, ч	Количество цепочек базовых протоколов, покрывающих все требования	Время генерации трасс с помощью метода эвристик, мин
60	107	16	110	4
124	148	35	30	9
497	57	50	223	18

Метод композиции состояний дерева поведения модели. Параллельно с методом эвристик значительное сокращение количества получаемых трасс достигается использованием композиции состояний дерева поведения модели. Смысл метода заключается в объединении некоторого числа состояний и переходов между ними в отдельный укрупненный элемент дерева – стаб («stub»), построении полного набора трасс внутри каждого стаба, а затем связывании множества стабов между собой небольшим числом трасс. Декомпозиция дерева поведения модели на множество стабов возможна различными способами, в частности, в соответствии с классификацией требований по функциональности. Такое разбиение фактически может быть определено структурой разделов исходной документации, которая используется при формализации требований. Другой подход заключается в декомпозиции поведенческого пространства по количеству связей, концентрируя в разных стабах состояния с большим числом связей и уменьшая число связей между стабами. В результате применения метода исключается экспоненциальный взрыв при переборе вариантов по разным стабам, при этом гарантируется покрытие всего множества поведений внутри каждого стаба.

Критерий покрытия требований и оптимизация набора тестовых сценариев. Для того чтобы определить, покрывается ли требование тестовым сценарием (или трассой VRS), необходимо сначала сформулировать критерий покрытия. Под критерием будем понимать последователь-

ность наблюдаемых причин и следствий некоторых событий («цепочку»), описывающих требование. Цепочка задается формулировкой всех ее элементов: начальных условий (причин), требуемых для выполнения определенной активности, самой активности и наблюдаемых результатов. Если цепочка встречается в трассе, это означает, что данная трасса покрывает соответствующее требование.

Для проверки покрытия требований в трассах используется матрица отслеживания (TRM – Traceability Matrix), в которую заносится информация обо всех требованиях в проекте. Матрица имеет пять колонок: «Identifier» – идентификатор требования; «Requirements» – текст требования; «Scenario of requirements» – непосредственно сама цепочка, т. е. последовательность наблюдаемых событий, которые должны произойти, чтобы требование выполнилось; «Scenario ID» – идентификатор цепочки; «Traceability» – последовательность базовых протоколов, содержащая цепочку событий в формализованном виде. Именно эта последовательность базовых протоколов ищется в трассах в процессе генерации. Если последовательность базовых протоколов, покрывающих требование, встречается в трассе, то данная трасса покрывает данное требование. Поиск покрытия осуществляется автоматически с помощью специального скрипта.

На рис. 3 приведен пример описания требования в матрице отслеживания и фрагмент трассы, покрывающей это требование (т. е. содержащей соответствующую цепочку базовых протоколов).

После нахождения множества трасс, покры-

Identifier	Requirements	Scenario of requirements	Scenario ID	Traceability
1335	Upon expiring of TXHoldoff timer, the ZC shall send RadioCallGrant to CCGW	1. Timer TXHoldoff expires. 2. ZC sends signal rRadioCallGrant to CCGW.	scn#1335	:1335 expTXHoldoff rRadioCallGrant1

Последовательность базовых протоколов, покрывающих требование 1335

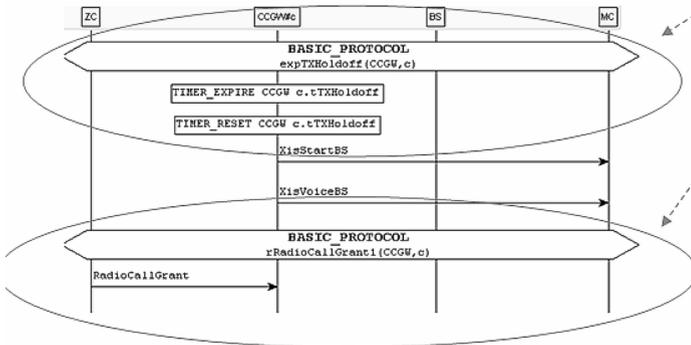


Рис. 3. Описание требования в матрице отслеживания и фрагмент покрывающей его трассы

вающего все требования проекта, осуществляется его оптимизация. В найденном множестве трасс возможны ситуации, когда в одной трассе покрываются два или даже больше требований, потому что она содержит сразу несколько цепочек. В оптимальном наборе трассы с повторным покрытием требования исключены. Оптимизация выполняется автоматически с помощью скрипта. Например, если трасса 1 покрывает требования 1 и 2, трасса 2 – только требование 1, а трасса 3 – только требование 2, то трасса 3 исключается. На этом же этапе осуществляется автоматическая разметка требований в трассах, которая с помощью цветных маркеров показывает начало покрытия требования (первое событие цепочки), конец по-

крытия (последнее событие) и все промежуточные шаги цепочки покрытия. На рис. 4 приведен пример разметки покрытого требования в трассе.

Оптимизация набора трасс, покрывающих требования, позволяет сократить количество трасс, используемых в дальнейшем для генерации исполняемых тестов, без ущерба качеству покрытия требований, что, в свою очередь, сокращает общее время тестирования.

В табл. 2 приведены результаты оптимизации наборов трасс в тех же трех телекоммуникационных проектах.

Методы эвристик и оптимизации набора трасс, покрывающих требования, позволили

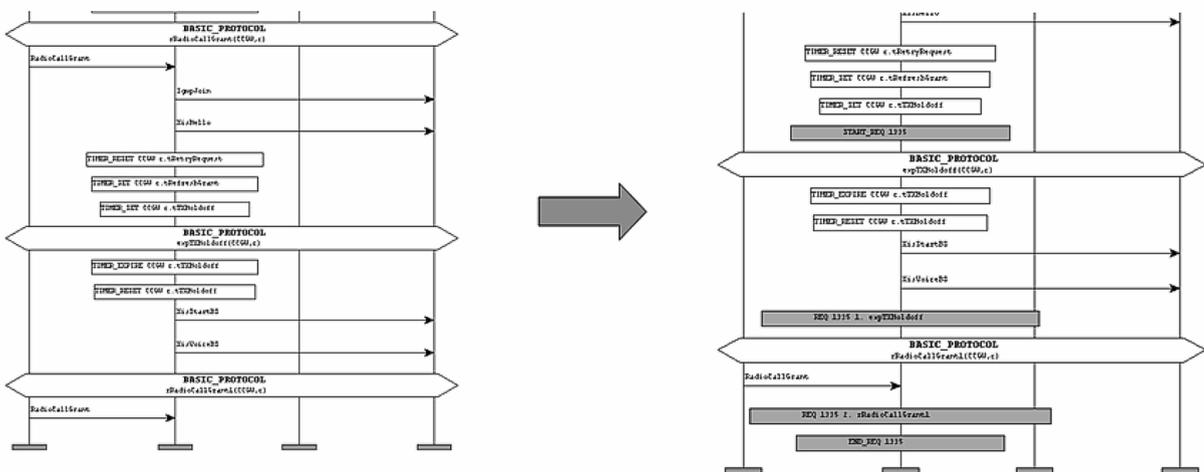


Рис. 4. Пример разметки покрытого требования в трассе

Таблица 2

Результаты оптимизации наборов трасс в телекоммуникационных проектах

Количество базовых протоколов в проекте	Количество требований в проекте	Количество полученных трасс, покрывающих все требования	Оптимальный набор трасс
60	107	110	46
124	148	30	26
497	57	223	195

значительно сэкономить время и трудоемкость анализа формальных моделей разрабатываемых систем, а также разработку тестов, проверяющих

их функциональность. Преимущества описанных методов были доказаны в ходе их применения в ряде крупных телекоммуникационных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boehm, B.** Software Risk Management: Principles and Practices. [Текст]/B. Boehm//IEEE Computer Society Press.
2. **Booch, Gr.** Object-Oriented Analysis and Design with Applications. [Текст]/Gr. Booch//Addison-Wesley Professional; 2 ed.–Oct. 10, 1993.
3. **Летичевский, А.А.** Спецификация систем с помощью базовых протоколов [Текст]/А.А. Летичевский, Ю.В. Капитонова, А.А. Летичевский (мл.) [и др.]/Кибернетика и системный анализ.–2005.–№ 4.–С. 3–21.
4. **Hoare, C.A.R.** Communicating Sequential Processes. [Текст]/C.A.R. –Hoare Prentice Hall. London, 1985.
5. **Letichevsky, A.** Basic Protocols, Message Sequence Charts, and the Verification of Requirements Specifications. [Текст]/A. Letichevsky, J. Kapitonova, A. Letichevsky Jr. [et al.]/Proc of ISSRE04 Workshop on Integrated-reliability with Telecommunications and UML Languages (ISSRE04:WITUL).–02 Nov 2004. –IRISA Rennes France.

УДК 004.415

Р.С. Муханов, В.О. Сафонов

РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ASPECT.NET ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ВЕРСИИ .NET

На сегодняшний день наиболее распространена методология объектно-ориентированного программирования (ООП). Менеджеры большинства новых проектов выбирают именно эту концепцию. Несмотря на эффективность подхода ООП, существуют проблемы, для которых нужна более совершенная методология. В современном мире промышленное производство программного обеспечения достигло таких масштабов и такой сложности, что с каждым днем все труднее и дороже обходятся его разработка, поддержка, отладка, добавление новой функциональности, докумен-

тирование, расширение и развитие. Сложность, присущая большинству современных программных систем, обусловлена четырьмя основными причинами: сложностью реальной предметной области, из которой исходит заказ на разработку; трудностью управления процессом разработки; необходимостью обеспечить достаточную гибкость программы; неудовлетворительными способами описания поведения больших дискретных систем [1].

Как в свое время на смену процедурному подходу пришло объектно-ориентированное про-



граммирование (ООП), так и сейчас на смену объектно-ориентированной концепции постепенно приходит совершенно новая парадигма – аспектно-ориентированное программирование (АОП). АОП является развитием процедурного и объектно-ориентированного программирования. Данная методология призвана снизить время, стоимость и сложность разработки современного программного обеспечения (ПО). Следует отметить, что концепция АОП не заменяет подход ООП, а органично дополняет его [2]. Появление новых методологий всегда способствовало развитию науки и индустрии программного обеспечения, т. к. любая новая концепция, любой новый подход – это решение проблем, являющихся предпосылками для ее появления. Сложность программных систем – ключевая проблема всей индустрии. Поэтому любая новая методология для решения этой задачи, в т. ч. АОП, является актуальным направлением научных исследований.

Суть концепции АОП заключается в том, что программная система рассматривается как совокупность различных компонент, отвечающих за ту или иную функциональность. Некоторую функциональность можно реализовать путем создания некоего модуля или нескольких модулей. Под «модулем» понимается некая четко выраженная структурная единица программы – процедура, функция, метод, класс, структура данных, пакет. Но есть еще такое понятие, как сквозная функциональность (crosscutting concerns), которую невозможно эффективно реализовать вышеописанным образом, ее нельзя выделить в отдельные сущности, т. к. фрагменты ее реализации рассредоточены по коду всей программной системы [3]. Реализация подобной сквозной функциональности без использования методологии АОП приведет к непонятному, рассредоточенному и запутанному коду, в котором абсолютно не связанные функциональности будут реализованы в одном модуле, повысит вероятность появления ошибок и некорректной работы системы в целом, что увеличит время и расходы на разработку. АОП предлагает сквозную функциональность выделять в специализированные модули – *аспекты* и реализовывать отдельно от бизнес-логики.

Статья описывает проект, поддержанный Microsoft Research, – разработку и реализацию AspectRotor 2.2, систему аспектно-ориентированного программирования для платформы SSCLI/Rotor 2.0 [9] на базе техноло-

гии Aspect.NET [2, 3]. В настоящее время, в силу ряда причин, описанных далее, не существует доступного инструментария АОП-разработки для shared-source платформы Rotor, несмотря на растущую популярность АОП-подхода к разработке ПО. Таким образом, данная работа имеет как теоретическую часть – исследование существующих подходов к разработке программного обеспечения с использованием парадигмы АОП, так и практическую – создание системы AspectRotor.

Понятие аспектно-ориентированного программирования (АОП). Основные понятия аспектно-ориентированного программирования: сквозная функциональность (cross-cutting concern), аспект (aspect), внедрение (weaving), набор правил внедрения (pointcut – a set of weaving rules for an aspect), точки присоединения (join points).

Аспект – это некоторый модуль, единица компиляции, содержащая в себе реализацию сквозной функциональности на некотором языке программирования. Он состоит из модулей (modules) (методы или функции), данных (data), действий (actions), правил внедрения (weaving rules). Каждое действие применяется (например, записывается в бинарный файл кода результирующей целевой программы), согласно правилам внедрения в конкретные точки присоединения (join points) целевого приложения (target application). Такой набор правил может быть определен отдельно от конкретного аспекта в качестве модуля правил, чтобы обеспечить возможность внедрения нескольких аспектов, согласно одинаковому набору правил. Посредством вызова действий аспекта целевое приложение использует сквозную функциональность. Таким образом, аспект инкапсулирует в себе определенную функциональность, которая никоим образом не зависит от контекста, в котором действия аспекта будут выполняться. На самом деле многие инженеры-разработчики используют аспекты в своей повседневной работе, но это происходит неявно. В результате отладка и поддержка программной системы обходятся очень дорого. Одна из причин – отсутствие функциональности АОП в языках программирования и используемых инструментах. Также существует проблема переиспользования аспектов. Не только модули, но и аспекты можно вновь использовать во многих приложениях. С глобальной точки зрения само понятие аспекта никоим образом не связано ни с одним языком программирования, ни с какой парадигмой, методологией. Аспект – это

общее фундаментальное понятие. В терминах инженерии знаний аспект можно рассматривать как гибридную коллекцию знаний [6]. Таким образом, в идеальном приложении аспект должен быть реализован в максимально общей форме, чтобы его можно было легко переиспользовать, без привязки к конкретному языку программирования.

Под внедрением аспекта понимается интеграция кода аспекта в код целевого приложения. Набор правил внедрения – это определенный набор правил, согласно которым происходит внедрение необходимого кода аспекта в соответствующее место в коде целевого приложения.

Точки присоединения (join points) – это конкретные точки в целевом приложении, в которых вызываются действия аспектов. Они определяются системой на основе правил внедрения (weaving conditions), определенных как часть правил внедрения аспекта. Эти условия внедрения содержат указания для системы АОП относительно точек вызова действия аспектов: до (before), после (after), вместо (instead); контекст вызова (вызываемый метод, присваивание или использование поля), а также групповые символы (wildcards) для определения контекста вызова. Процесс внедрения аспекта состоит из трех фаз: поиска точек присоединения в целевом приложении, их фильтрации, а затем выполнения действий аспекта в выбранных точках.

Обзор существующих технологий. На данный момент большинство инструментов для разработки программного обеспечения с использованием парадигмы АОП ориентированы на технологию Java, что сильно ограничивает их гибкость и применимость. Microsoft.NET – среда, популярность которой среди разработчиков растет, что является предпосылкой разработки инструментов АОП для данной платформы. Подобные решения для платформы Microsoft.NET (Aspect#, Loom.NET, Weave.NET, R#, Spring.NET и т. д.) пока находятся на стадии академических научно-исследовательских экспериментов. В целом развитие всей методологии АОП сейчас находится на этапе перехода от научно-исследовательских экспериментов к широкому промышленному использованию.

Некоторые решения АОП, существующие для Microsoft.NET, просто расширяют какой-либо конкретный язык программирования .NET средствами АОП. Это является серьезным огра-

ничением, т. к. невозможно использовать подобные инструменты для других языков платформы .NET. Также при такой одноязычности невозможно применять существующее огромное количество утилит, упрощающих разработку для данной платформы. Другие недостатки – низкая производительность результирующих программ и недостаток инструментария для просмотра результатов внедрения без декомпиляции.

В настоящее время применяются различные подходы разработки программных систем с использованием методологии АОП. Рассмотрим их преимущества и недостатки. Динамический подход (runtime weaving) реализован в системе Spring.NET: внедрение происходит во время исполнения программы, т. е. при выполнении некоторых условий вызываются действия аспекта. У этого подхода есть серьезный недостаток – низкая производительность. Расширение существующего языка (AspectJ, Aspect#) приводит к необходимости создания специального компилятора для расширенного языка и его модификации при каждом расширении базового языка. При статическом внедрении на уровне сборок (Aspect.NET) достигается высокая производительность, имеется явная доступность результатов (через средства декомпиляции) и, благодаря декомпозиции на сквозную функциональность и основную бизнес-логику, код становится более структурированным.

AspectJ – первый и до сих пор наиболее популярный инструмент для разработки программного обеспечения с помощью методологии АОП, ориентированный на Java-технологию. По сути, в нем используется расширенный АОП-конструкциями язык Java. Немалую роль в распространении AspectJ сыграла интеграция с популярными средами разработки, например, JBuilder. Но наиболее развитой надстройкой, также разработанной группой инженеров под руководством Грегора Кикжалеса, является AspectJ Development Tools для интегрированной среды разработки Eclipse. Несмотря на его популярность, AspectJ все еще находится на стадии перехода от исследовательского проекта к коммерческому использованию.

Aspect.NET – инструмент для разработки ПО с использованием методологии АОП, разработанный группой аспирантов под руководством профессора В.О. Сафонова в рамках программы Microsoft Research. Aspect.NET реализован как add-in к популярной интегрированной среде раз-

работки – Microsoft Visual Studio; это означает, что данный инструмент не нужно запускать отдельно, он запускается одновременно с запуском самой среды и интегрирован с ней.

AspectRotor. Основная идея AspectRotor – предоставить пользователям возможность применять АОП при разработке программного обеспечения для академической версии .NET – платформы SSCLI/Rotor. Основные технологии, на которых построена новая версия AspectRotor 2.2:

Phoenix Research Development Kit (RDK) June 2008 [7];

SSCLI (Shared Source Common Language Infrastructure)/Rotor 2.0;

QT SDK [8];

Aspect.NET 2.2.

AspectRotor представляет собой систему аспектно-ориентированного программирования для академической версии .NET – платформы Microsoft Shared Source Common Language Infrastructure (SSCLI), или Rotor, на базе технологии Aspect.NET. В настоящее время не существует доступного инструментария АОП-разработки для shared-source платформы Rotor, несмотря на растущую популярность АОП-подхода к разработке ПО. Причинами являются незавершенность самой платформы, усложняющая адаптацию и применение напрямую технологий, разработанных для коммерческой версии платформы .NET, динамическое внедрение кода, несовместимость форматов отладочной информации, внедрение во время загрузки и т. п. Такое положение приводит к тому, что для среды Rotor приходится заново реализовывать весь набор инструментов АОП-разработки. Наряду с отсутствием штатных сервисов построения графического пользовательского интерфейса это многократно усложняет задачу.

Теоретическая часть включает в себя подробное исследование существующих подходов к разработке программного обеспечения с использованием методологии АОП, обзор необходимых технологических и инструментальных средств для разработки в среде Rotor, проектирования кросс-платформного графического интерфейса с помощью библиотеки QT.

Практической частью явилось создание готового продукта для разработки АО программ, причем использование готовых компонентов Aspect.NET, таких, как подсистема внедрения аспектов и конвертеры описаний аспектов из метаязыка, по-

зволило избежать вышеперечисленных трудностей и впервые предложить пользователям мощную среду разработки аспектно-ориентированных программ для Rotor-платформы. Одновременно с этим разработаны средства инсталляции продукта и необходимая документация.

Рассмотрим несколько примеров практического использования – создания в среде AspectRotor аспекта на метаязыке с последующим внедрением в код основной бизнес-логики целевого приложения.

Аспект 1, описанный на метаязыке. Это простой пример профилирующего аспекта, печатающего какие-либо трассировочные данные, что является частой и повседневной задачей практически в любой современной программной системе:

```
%aspect Aspect
using System;
using AspectDotNet;
{
    %modules
        public static void Say (String s) { Console.
WriteLine(s); }

    %rules
        %before %call *
        %action
        public static void SayHello () {Say(«Hello»); }

        %after %call *
        %action
        public static void SayBye () {Say («Bye»); }
}
```

Аспект 1. После конвертации метаязыка в язык C#:

```
namespace Aspect {
    using System;
    using AspectDotNet;

    public class Aspect
    {
        [AspectDef(«Aspect», «module», «>», «>>)]
        public static void Say(String s) { Console.
WriteLine(s); }

        [AspectDef(«Aspect», «action», «%before
%call *», «>>)]
        public static void SayHello() {Say(«Hello»); }
```

```
[AspectDef(«Aspect», «action», «%after
%call *», «»)]
public static void SayBye() { Say («Bye»); }
}
```

Целевое приложение 1, где описана основная бизнес-логика:

```
using System;
class MainApp
{
public static void Main()
{
HelloFunction();
}
static void HelloFunction()
{
Console.WriteLine(«Hello, World!»);
}
}
```

Целевое приложение 1 выводит на консоль следующие данные:

Hello, World!

Результирующее приложение 1 (после применения аспекта), исходный код после декомпиляции, например, используя Red Gate .NET Reflector:

```
using System;
class MainApp
{
public static void Main()
{
Aspect.Aspect.SayHello();
HelloFunction();
Aspect.Aspect.SayBye();
}
static void HelloFunction()
{
Aspect.Aspect.SayHello();
Console.WriteLine(«Hello, World!»);
Aspect.Aspect.SayBye();
}
}
```

Результирующее приложение 1 печатает на консоль иные данные:

Hello
Hello
Hello, World!
Bye
Bye

Таким образом, мы видим, что результирующее приложение изменилось соответствующим об-

разом после применения вышеуказанных действий аспекта. Исходный код при этом никоим образом не изменялся, все трансформации происходят на уровне MSIL посредством инструмента Phoenix.

Целевое приложение 2 представляет собой простейшей пример ситуации, когда необходима более тщательная обработка ошибок:

```
public class BreakerTester
{
public static void Breaker(int n)
{
Console.WriteLine(«Breaker call number» + n);
switch (n)
{
case 1: throw new ArgumentException();
case 2: throw new NullReferenceException();
case 3: throw new IndexOutOfRangeException();
default: throw new InvalidOperationException();
}
}
static void Main(string[] args)
{
Breaker(1);
Breaker(3);
Breaker(10);
Console.WriteLine(«Press ENTER to exit»);
Console.ReadLine();
}
}
```

Целевое приложение 2 в виду необработанного исключения аварийно завершается после печати на консоль следующих данных:

Breaker call number 1

Аспект 2, метаязык. Данный аспект позволяет быстро диагностировать приложение и внести в него соответствующие поправки для правильной работы:

```
%aspect Aspect1
class Aspect1
{
%instead %call *BreakerTester.Breaker(int)
&& args(..)
%action
public static void WrapperAction (int n)
{
try
{
```

```

    BreakerTester.Breaker(n);
}
catch (Exception e)
{
    string s = e.ToString();
    Console.WriteLine («Breaker call number» +
n + «finished» + «Exception handled:»);
    Console.WriteLine(s.Substring(0, s.IndexOf(«:»)));
}
}
}
}

```

Результирующее приложение 2 с примененным аспектом можно легко диагностировать:

```

Breaker call number 1
Breaker call number 1 finished. Exception
handled:
System.ArgumentException
Breaker call number 3
Breaker call number 3 finished. Exception
handled:
System.IndexOutOfRangeException
Breaker call number 10

```

Breaker call number 10 finished. Exception handled:

```

System.InvalidOperationException
Press ENTER to exit

```

Парадигма АОП до сих пор находится в стадии научных исследований, несмотря на свою очевидную перспективность и теоретическую обоснованность. Основные причины – недостаточная поддержка существующими инструментами АОП традиционных процессов разработки программного обеспечения; отсутствие длительного опыта использования данной концепции, сдерживающего начало широкого использования этой методологии в промышленных разработках.

Система AspectRotor, созданная Р. Мухановым, позволяет использовать АОП при разработках для академической версии .NET – платформы SSCLI/Rotor, способствует более широкому использованию и распространению АОП, не ограничиваясь лишь платформами Java и (коммерческой) Microsoft.NET. Это позволит сделать еще один шаг для накопления индустрией ПО опыта в создании программных систем с использованием данной методологии, что, безусловно, усилит ее развитие и активное использование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование [Текст]/Г. Буч.–СПб.: Бином, Невский диалект, 1999.
2. Safonov, V.O. Using aspect-oriented programming for trustworthy software development [Текст]/V.O. Safonov// Wiley Interscience.–John Wiley & Sons, 2008. –P. 338
3. Сафонов, В.О. Aspect.NET – инструмент аспектно-ориентированного программирования для разработки надежных и безопасных программ [Текст]/ В.О. Сафонов//Компьютерные инструменты в образовании.–2007.–№ 5.
4. Safonov, V.O. Aspect.NET – an aspect-oriented programming tool for Microsoft.NET [Текст]/V.O. Safonov, D.A. Grigoriev//Proc. of IEEE Regional conf.–St. Petersburg, 2005.
5. Safonov, V.O. Aspect.NET: concepts and architecture [Текст]/V.O. Safonov//.NET Developer's Journal.–Oct. 2004.
6. Safonov, V.O. Aspect.NET – A New Approach to Aspect-Oriented Programming [Текст]/V.O. Safonov// NET Developer's Journal.–Apr. 2003
7. Сайт, посвященный Phoenix Academic Program [Электронный ресурс] <http://www.research.microsoft.com/phoenix/>
8. Документация по QT SDK компании Nokia [Электронный ресурс] <http://doc.qt.nokia.com/>
9. Shared Source Common Language Infrastructure/ Rotor 2.0 [Электронный ресурс] <http://research.microsoft.com/sscli/>
10. Aspect-Oriented Software Development Community & Conference [Электронный ресурс] <http://aosd.net/>

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ В ОБЛАСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Тестирование – неотъемлемый этап любого современного процесса промышленной разработки программного обеспечения. На сегодняшний день использование до 40 % ресурсов на тестирование не является чем-то необычным для компании, производящей программные продукты. Поэтому вопросы автоматизации и эффективности тестирования весьма актуальны.

В статье описываются этапы технологии, объединяющей верификацию, тестирование и генерацию кода с целью повышения качества продукта, уменьшения трудоемкости и сокращения стоимости. В основе предлагаемого подхода лежит идея переиспользования результатов, полученных на этапе верификации. Верификация позволяет не только повысить качество и формально доказать отсутствие ошибок в алгоритме, но и создает модель системы, подмножество путей дерева поведения которой может рассматриваться как тестовые сценарии. Число таких путей в промышленных проектах огромно, поэтому требуются специальные фильтрующие техники для получения подходящего (оптимального) тестового набора. Этот подход применим не только для автоматизации создания функциональных тестов, но также и для автоматической проверки соответствия стандарту в том случае, если имеется формальная модель соответствующего стандарта.

На практике соответствие стандарту проверяется достаточно большим количеством тестов, создаваемых вручную. Предлагаемый подход позволяет избежать ручной работы за счет переиспользования результатов этапа верификации.

Статья раскрывает основные принципы автоматической генерации тестовых наборов на основе формальных спецификаций, представленных на языке базовых протоколов, при помощи инструмента верификации VRS [1, 2] и инструмента автоматизации тестирования TAT [3].

Общее описание технологии

Рассматриваемая технология обеспечивает частичную автоматизацию ручной работы в про-

цессе создания программного обеспечения, путем генерации кода из высокоуровневых моделей, и повышение качества продукта за счет интеграции верификации и тестирования.

Общий обзор технологии показан на рис. 1. Создание программного продукта начинается с интерпретации и формализации требований.

Шаг 1. Формализация. Инженеры создают модель системы в терминах базовых протоколов. Базовый протокол – это формальное описание некоторого действия, которое происходит в том случае, если система из некоторого определенного состояния (предусловия) переходит в новое состояние (постусловие). Другими словами, базовый протокол – это маленький «фрагмент поведения» системы. Базовые протоколы представляются в следующей нотации:

$$\forall X : \alpha(X) \xrightarrow{\mu(X)} \beta(X),$$

где X – это список параметров протокола; α – предусловие; β – постусловие; μ – действие; α , μ и β могут зависеть от X . Это «тройка Хоара» [4].

Формализм базовых протоколов основывается на теории агентов и сред с инсерционной функцией [5]. Она была предложена А.А. Летичевским для создания поведенческих моделей систем, пригодных для верификации [6, 7]. Базовый протокол – это небольшая MSC диаграмма [9].

Два базовых протокола могут быть последовательно соединены, если постусловие одного эквивалентно предусловию второго. Комбинации соединений протоколов образуют дерево поведения. Каждый путь в таком дереве – это сценарий возможного поведения системы.

Формализация во многом ручной процесс, но и она в некоторой степени может быть автоматизирована или упрощена. Например, пользователь может проводить формализацию в терминах поведенческих сценариев (Use Case Maps (UCM) [8] или Message Sequence Charts (MSC) [9]) или UML [10] моделей. Существуют специальные инструменты для генерации базовых протоколов из UCM, MSC и UML.

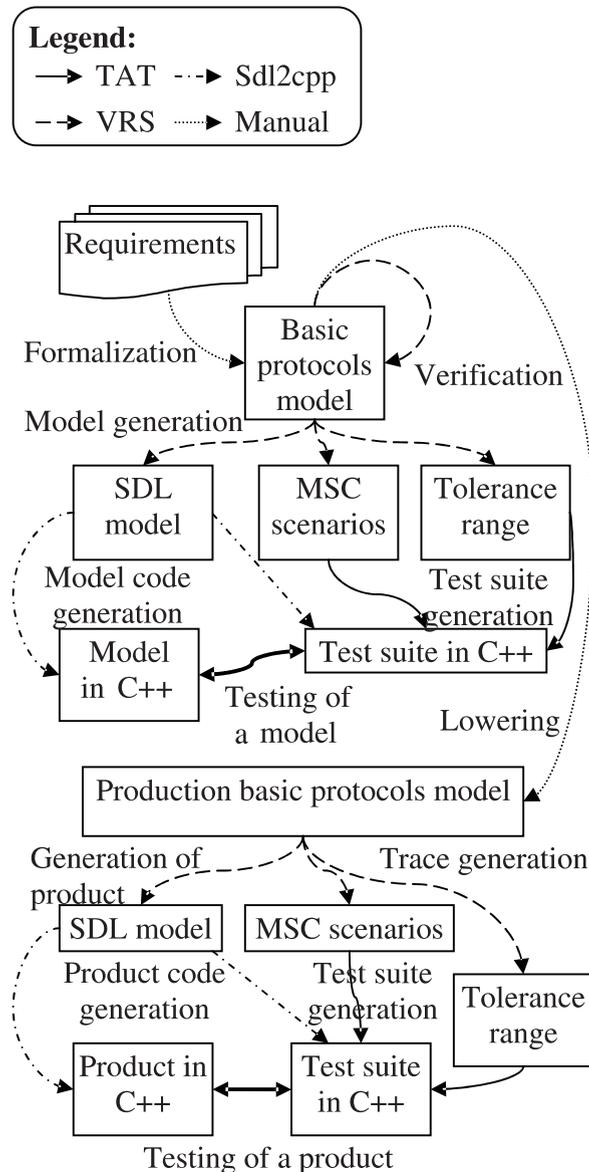


Рис. 1. Обзор технологии

Шаг 2. Верификация. На модели системы, представленной в терминах базовых протоколов, проверяются различные свойства при помощи VRS.

Набор базовых протоколов может быть интерпретирован как набор состояний и переходов, т. е. как автомат. Имея автомат, описывающий поведение системы, возможно сгенерировать код системы на целевом языке. Однако прямая генерация целевого кода не всегда эффективна, поэтому используется промежуточное представление. В качестве промежуточного языка выбран SDL (Specification Description Language) [11] – простой

и достаточно известный язык описания автоматов. Наличие промежуточного языка делает отладку моделей более удобной.

Шаг 3. Преобразование проекта из базовых протоколов в SDL код. Соответствующее преобразование осуществляется автоматически.

Шаг 4. Генерация целевого исполняемого кода. Для генерации C++ используется инструмент Sdl2cpp, он интегрирован в общую технологическую цепочку. Sdl2cpp дополнительно генерирует конфигурационный XML файл для TAT (Test Automation Toolset) [3] с описанием тестового окружения. Таким образом, в случае использования Sdl2cpp вместе с TAT, конфигурирование тестового окружения происходит без участия пользователя (при этом пользователь решает задачи адаптации к целевой платформе путем корректировки автоматически заданных настроек).

После получения исполняемого кода и настройки тестового окружения становится возможным автоматическое тестирование и симуляция в реальном времени. На этом этапе достаточно удобна возможность пошаговой симуляции (например, в IBM Rational Suite [12]) с отслеживанием поведения системы в графическом режиме.

Шаг 5. Создание критерия тестового покрытия. Модель в терминах базовых протоколов – это дерево поведения с огромным числом возможных сценариев. Покрыть такое дерево тестами практически невозможно, поэтому требуется специальный критерий фильтрации.

В описываемой технологии используется критерий цепочек, который позволяет обеспечить покрытие функциональных требований с помощью относительно небольшого тестового набора. Критерий требует создания «цепочки» для каждого требования [13]. «Цепочка» – это последовательность ключевых воздействий и реакций тестируемой системы, соответствующих поведению, необходимому для проверки покрытия некоторого требования.

Создание цепочек – это процесс интерпретации требований, поэтому эта работа выполняется вручную. Процесс создания цепочек значительно упрощается и частично автоматизируется, если заказчик предоставляет требования в некоторой формальной нотации, например, в виде UCM или MSC.

Шаг 6. Генерация тестовых сценариев. VRS использует цепочки для «направленного» поиска

в дереве поведения модели тестируемой системы и генерирует трассы, если в модели удастся найти путь с заданными в цепочках последовательностями событий. В результате появляется набор трасс (MSC), покрывающих функциональные требования.

Шаг 7. Из MSC сценариев происходит генерация исполняемого кода тестов и тестового окружения на целевую платформу. Здесь же осуществляется замена символических параметров MSC сценариев конкретными значениями, взятыми из областей их допустимых значений.

Шаг 8. Исполнение тестов из тестового цикла.

Шаг 9. Детализация. Верификация индустриальных проектов требует абстрагирования от некоторых деталей. Поэтому модель из базовых протоколов следует детализировать после верификации и перед генерацией кода продукта. Обычно требуется поддерживать две модели в рамках одного проекта: высокоуровневая модель для верификации, моделирования и симуляции и детализированная модель для генерации и тестирования кода продукта. Каждая модель требует свой собственный тестовый набор.

Обычно детализация подразумевает добавление пропущенных параметров сигналов, раскрытие функциональных «заглушек». Например, когда сложное поведение абстрагировано в одном сигнале. Детализация, так же как и формализация, является во многом ручной работой.

За детализацией модели следует генерация соответствующего ей кода целевого продукта. Для этого необходимо повторить шаги 3 и 4 для детализированной модели, а для генерации соответствующего тестового набора – шаги 6 и 7 (шаг 5 не обязателен, т. к. цепочки высокоуровневой модели подходят и для низкоуровневой).

Автоматизация тестирования

Четыре шага (5–8) описанной технологической цепочки относятся к получению и исполнению тестов.

Создание тестов начинается с интерпретации требований и формулирования критерия покрытия в терминах цепочек. Эти цепочки используются для направленного поиска в дереве поведения модели, и, как результат, из бесконечного набора поведений системы выбирается конечное число тестовых сценариев, покрывающих функциональ-

ные требования. Специальный скрипт используется для выбора минимального тестового набора из сгенерированных инструментом VRS трасс. Этот скрипт также размечает трассы (MSC), отмечая в них начало и конец проверки требования, а также события, заданные в цепочке.

VRS может работать в двух режимах. Первый режим – это обычная верификация (model checking), где все параметры имеют конкретные значения. Второй режим называется «символическим», т. к. параметры содержат символические значения, а область допустимых значений параметров вычисляется после применения каждого базового протокола. Таким образом, в случае «символического» режима существует дополнительный шаг – замена в MSC трассах символических параметров конкретными значениями, взятыми из области допустимых значений.

Одна диаграмма с символическими параметрами в действительности описывает набор эквивалентных поведений (одинаковая последовательность сигналов для любых значений параметров из допустимого диапазона). Принимая во внимание ограничения на параметры и зависимости между параметрами, из одной «символической» диаграммы можно сгенерировать несколько тестов.

Будем называть профилем один (из множества возможных) набор значений параметров для одной символической диаграммы. Обычно используются следующие профили:

«минимальный» профиль – все независимые параметры имеют минимальные (из области допустимых) значения;

«максимальный» профиль – все независимые параметры имеют максимальные (из области допустимых) значения;

«случайный» профиль – все независимые параметры имеют случайные (из области допустимых) значения;

«ошибочный» профиль – хотя бы один из параметров имеет значение, не попадающее в допустимую область. Тест с ошибочным профилем должен всегда заканчиваться фиксацией ошибки.

Для генерации тестового набора на целевом языке на основе MSC сценариев с подставленными значениями и файла с описанием окружения (в формате XML) используется TAT.

Генерация тестового набора состоит из нескольких основных шагов:

анализ конфигурационного XML файла и генерация кода тестового окружения, зависящего от настроек конфигурации;

генерация абстрактного тестового набора (Abstract Test Suite (ATS)) – представления тестового набора в виде системы состояний и переходов на языке tcl. ATS генерируется на основе набора MSC;

генерация целевого кода тестового набора на основе ATS.

TAT имеет достаточно гибкий механизм шаблонов генерации кода. При помощи шаблонов TAT может быть настроен на генерацию кода на любом целевом языке. В основном используется шаблон для генерации C++, но ряд других языков также поддерживается, включая Java SE, Java ME и TTCN-3.

Сгенерированный тестовый набор взаимодействует с тестируемой системой при помощи IP (TCP/UDP) или IPC (STRAM/DATAGRAM) сокетов. В конфигурационном XML файле задается следующая информация:

- тип используемых сокетов;

- код инициализации, исполняемый в начале каждого теста;

- код, выполняемый в конце каждого теста;

- время ожидания входящих сообщений;

- код, отвечающий за распознавание сигналов;

- код сериализации/десериализации сообщений (генерируется автоматически при использовании Sdl2cpp);

- описание экземпляров MSC диаграмм и их интерфейсов (генерируется автоматически при использовании Sdl2cpp);

- разделитель входящих сообщений (генерируется автоматически при использовании Sdl2cpp).

TAT и Sdl2cpp тесно интегрированы друг с другом. Sdl2cpp может не только генерировать целевой код из SDL, но также полностью настраивать TAT для тестирования этого кода. Наряду с автоматической поддерживается возможность ручной настройки. Конфигурация TAT хранится в двух файлах: первый генерируется Sdl2cpp, второй создается вручную. При наличии противоречащих настроек приоритет отдается второму файлу.

Результатом запуска сгенерированного тестового набора являются лог файлы, представленные в формате MSC и в текстовом формате. Специальный инструмент (Offline Test Results Analyzer (OTRA)) сравнивает исходные MSC диаграммы с

MSC-логами и создает суммарный тестовый отчет. Каждая запись в этом отчете – это ссылка на более подробное описание деталей сравнения и причин ошибки.

Предлагаемый подход автоматической генерации тестовых наборов на основе формальных спецификаций позволяет значительно сократить усилия и временные затраты на создание тестов. Естественно, он не может быть применен для проверки любого требования, т. к. иногда требования не могут быть выражены в терминах MSC диаграмм или последовательности ключевых событий. Для таких требований тесты приходится создавать вручную. Но на практике (особенно в области телекоммуникаций) большинство требований могут быть автоматически покрыты тестами в случае применения данной технологии.

Автоматизация создания функциональных тестов является не единственным преимуществом данного подхода, он также может быть применен для проверки на соответствие с определенным стандартом взаимодействия между тестируемой системой и окружением, что очень важно для телекоммуникационных проектов.

Автоматизация проверки соответствия стандартам

Процесс тестирования на совместимость и соответствие стандартам зачастую является достаточно долгим и трудоемким. Однако обойтись без него нельзя, т. к. стоимость выпуска продукции, не соответствующей стандартам, значительно превосходит затраты на тестирование.

Вопрос здесь может быть поставлен следующим образом: если имеется некоторая система, которая взаимодействует с тестовым окружением или другими системами, как определить, происходит ли это взаимодействие в соответствии с некоторым стандартом или нет. Другой важный вопрос – имеются ли противоречия в спецификации стандарта.

Предлагаемый подход проиллюстрирован архитектурной схемой (рис. 2), ориентированной на решение этих вопросов.

Шаг 1. Верификация, в рамках которой проверяется корректность стандарта. Верификация стандарта – это не простая задача. Формализация его спецификации – самая сложная часть этого шага, требующая серьезных усилий. К сожалению, формализация с большим трудом поддается полной автоматизации, т. к. это процесс

понимания и интерпретации требований. Однако верификация позволяет не только формально доказать отсутствие ошибок, но и помочь ответить на первый вопрос.

В случае использования нотации базовых протоколов, формализованная модель представляет собой набор состояний и переходов между ними, т. е. автомат. Этот автомат может быть использован как оракул процесса тестирования, если поместить его между тестируемой системой и тестовым окружением или между тестируемой системой и другими системами (которые соответствуют проверяемому стандарту).

Шаг 2. Генерация целевого кода для этого

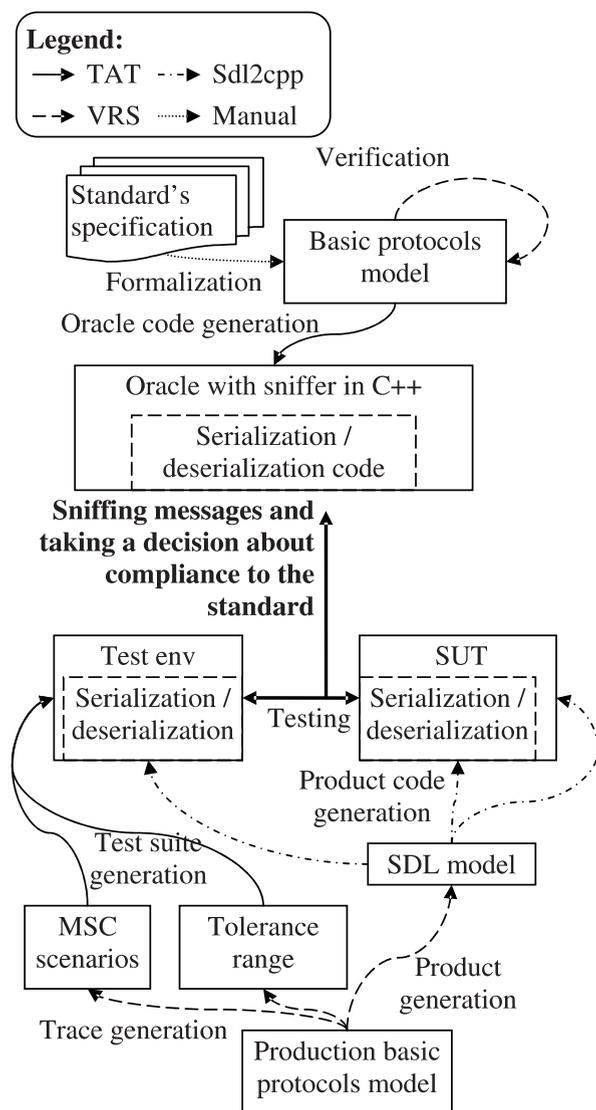


Рис. 2. Схема проверки соответствия приложения стандарту

автомата и использование его совместно с агентом наблюдения за поведением исследуемой системы (в простейшем случае таким агентом может являться обычный sniffер пакетов). Для генерации целевого кода такого автомата возможно использование ядра TAT.

Обычно когда инструмент Sdl2cpp генерирует целевой код системы из SDL, он также генерирует функции сериализации и десериализации для каждого типа данных и для каждого сигнала, который может быть послан в окружение или получен из него. Эти функции используются для кодирования и декодирования сообщений как на стороне тестируемой системы, так и на стороне окружения, генерируемого при помощи TAT. Другими словами, Sdl2cpp автоматически настраивает TAT и предоставляет ему API для кодирования и декодирования сигналов. Это делает обмен сообщениями «прозрачным» для пользователя, работающего на уровне абстракции сигналов и не беспокоящегося о том, что в действительности пересылается по сокетам. При этом поддерживается возможность наблюдения за сообщениями на уровне сокетов. Аналогичная идея применима и для оракула, который также, в свою очередь, нуждается в средстве сопоставления сообщений сокетов с высокоуровневыми сигналами.

Таким образом, оракул, проверяющий соответствие системы стандарту, будет состоять из следующих частей (рис. 3):

автомат, сгенерированный инструментами TAT на основе модели стандарта, представленной в терминах базовых протоколов;

код десериализации сообщений, сгенерированный Sdl2cpp;

агент наблюдения за поведением системы.

Шаг 3. Тестирование. На этом шаге система и окружение взаимодействуют в обычном режиме (при помощи обмена сообщениями через сокет), и единственным отличием является наличие оракула, который при помощи агента наблюдения за поведением перехватывает сигналы, декодирует их и принимает решение о соответствии стандарту.

Решение о соответствии стандарту принимается по следующему алгоритму.

1. Оракул перехватывает сообщение и пытается декодировать его. Если сообщение не удастся декодировать, то оно не соответствует стандарту.

2. Если сообщение успешно декодировано, оракул проверяет наличие перехода из текуще-

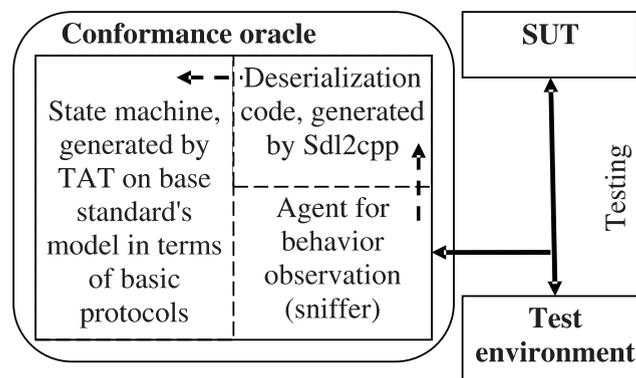


Рис. 3. Оракул

го состояния, где условием перехода является получение данного сигнала. Если такого перехода не существует, то система не соответствует стандарту.

3. Оракул проверяет параметры сигнала. Если значения параметров находятся в области допустимых значений, оракул производит переход на следующее состояние и ожидает прихода следующего сигнала, в противном случае – система не удовлетворяет стандарту.

Уверенность в том, что система соответствует стандарту, растет в зависимости от количества запущенных тестов при включенном оракуле.

Разработанный подход к автоматизации тестирования был успешно применен в нескольких достаточно крупных проектах в области телекоммуникации.

Наибольшая эффективность, измеряемая сокращением трудоемкости и сроками сдачи продукта, достигается в случае применения этого подхода как части описанной общей технологии.

Предлагаемый подход к проверке системы на соответствие стандартам, перспективен, несмотря на сложность формализации стандартов, и позволяет значительно повысить качество программного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Drobintsev, P.D.** Integririvannaia tehnologia obespechenia kachestva programmnih produktov s pomoshiu verifikacii i testirovaniia [Текст]/P.D. Drobintsev//Kand. dis., SPbGPU.–2006.–238 p.
2. **Letichevsky, A.** Basic protocols, message sequence charts, and the verification of requirements specifications [Текст]/A. Letichevsky, J. Kapitonova, Jr.A. Letichevsky [et al.]//Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking.–Dec. 2005.–Vol. 49–№ 5.–P. 661–675
3. **Веселов, А.О.** Автоматизация тестирования телекоммуникационных приложений [Текст]/А.О. Веселов, А.С. Иванов, Б.В. Тютин, В.П. Котляров//Научно-технические ведомости СПбГПУ–2009.–№ 3.
4. **Hoare, C.A.R.** Communicating sequential processes [Текст]/C.A.R. Hoare. –Prentice Hall, London, 1985.
5. **Letichevsky, A.A.** Insertion Programming [Текст]/A.A. Letichevsky, J.V. Kapitonova, V.A. Volkov [et al.]//Cybernetics and Systems Analysis.–Jan. 2003.–Vol. 39.–Iss. 1.–P. 16–26.
6. **Letichevsky, A.A.** System Specification with Basic Protocols [Текст]/A.A. Letichevsky, J.V. Kapitonova, V.A. Volkov [et al.]//Cybernetics and Systems Analysis.–Jul. 2005.–Vol. 41.–Iss. 4.–P. 479–493.
7. **Baranov, S.** Leveraging UML to deliver correct telecom applications in UML for Real: Design of Embedded Real-Time Systems [Текст]/S. Baranov, C. Jervis, V. Kotlyarov [et al.]; by L.Lavagno, G. Martin, B. Selic (editors). –Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 323–342.
8. Recommendation ITU-T Z.151. [Электронный ресурс] User requirements notation (URN), 11/2008.
9. ITU Recommendation Z.120. [Электронный ресурс] Message Sequence Charts (MSC), 11/99.
10. OMG Unified Modeling Language. [Электронный ресурс] <http://www.omg.org/spec/UML/2.2/>
11. ITU-T Recommendation Z.100. [Электронный ресурс] CCITT Specification and Description Language (SDL), 03/93.
12. IBM Rational SDL Suite [Электронный ресурс] <http://www-01.ibm.com/software/awdtools/sdlsuite/>
13. **Воинов, Н.В.** Верификация и автоматизация тестирования UML проектов [Текст]/Н.В. Воинов, В.П. Котляров//Научно-технические ведомости СПбГПУ.– 2009.–№ 3.

УДК 004.415

П.Д. Дробинцев, М.Ш. Даишев, В.П. Котляров

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ECLIPSE

В ходе разработки программного обеспечения одним из наиболее трудоемких процессов является тестирование [1]. В настоящее время большое внимание уделяется сокращению затрат на тестирование за счет автоматизации данного процесса. Это позволяет, с одной стороны, исключить влияние человеческого фактора, а с другой, – ускорить процесс проверки ПО на наличие в нем дефектов. Для автоматизации тестирования необходимо решить проблему инвариантного задания тестов в некотором формальном виде, который может быть исполнен компьютером без участия человека или с его минимальным участием. В данном направлении ведется масса исследований по созданию новых стандартов и инструментальных средств, которые объединяются в рамках такого направления как Computer Aided Software Engineering (CASE). Наиболее известные графические стандарты, используемые в тестировании, – UML [2] и MSC [3]. В рамках языка UML (Unified Modeling Language) для тестирования обычно используются диаграммы последовательности (Sequence Charts), позволяющие описать последовательность воздействий на тестируемую систему и ее отклики. Широко зарекомендовавший себя в промышленном применении язык MSC (Message Sequence Charts) является подмножеством UML. Упомянутые выше языки содержат не только графическую нотацию для создания диаграмм, но и текстовую, которая преимущественно используется для автоматизации тестирования.

Другой компонентой автоматизации является инструментальное средство, поддерживающее выбранную нотацию. Существует огромное количество инструментов автоматизации, позволяющих в той или иной степени облегчить жизнь тестировщику. Это такие инструменты, как Rational TTCN suite [4], Rational TAU, Test Real Time, Test Vector Generation [5], UniTestK [6], Conformiq Test [7], TAT[8] и др.

Перечисленные инструменты можно разделить на две категории. К первой относятся уни-

версальные средства автоматизации тестирования, а ко второй – специализированные средства автоматизации. Универсальные средства позволяют решать широкий круг задач, связанных с автоматизацией процессов настройки тестового окружения, генерацией и автоматизацией исполнения тестового набора, анализом результатов тестирования. Как правило, их применение требует серьезных затрат на адаптацию к платформе и применению. Их основная проблема – тяжеловесность и дороговизна лицензии. Недостатком специализированных средств является узкая область эффективного применения.

В данной статье рассматривается универсальная интегрированная среда, предоставляющая сервисы по настройке и управлению процессом автоматизации тестирования, основанная на использовании стандарта MSC в качестве языка описания тестов и инструмента TAT (Test Automation Toolset), предназначенного для генерации и автоматического исполнения тестового набора.

Интегрированная среда автоматизации тестирования. Основана на использовании технологии eclipse, что позволяет обеспечить платформенезависимость и максимально упростить работы по настройке и сопровождению. Интегрированная среда состоит из следующих модулей:

парсера, предназначенного для импорта и экспорта данных по настройке тестового окружения из внутренней модели данных;

модели данных, позволяющей хранить информацию из конфигурационного файла в специализированной модели среды eclipse;

пользовательского интерфейса, основанного на применении технологии GEF (Graphical Editing Framework), дающего возможность быстрого ввода и редактирования данных;

менеджера запуска – модуля, позволяющего легко собирать произвольные цепочки запуска инструментов TAT и вспомогательных скриптов.

Архитектура интегрированной среды представлена на рис. 1. Среда реализована в виде модуля (плагины) для eclipse, что позволяет макси-

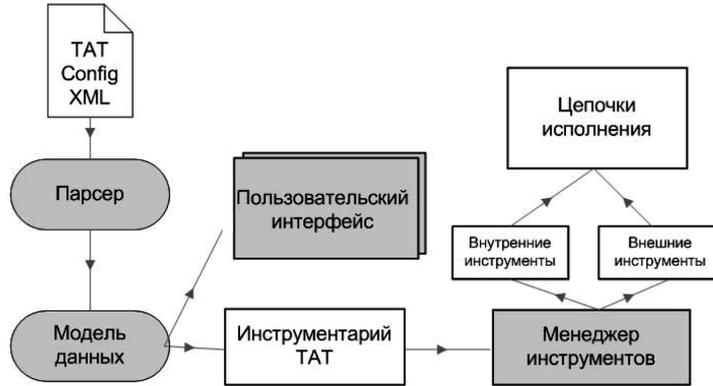


Рис. 1. Интегрированная среда автоматизации тестирования

мально упростить ее установку и настройку. Используемая модулем модель данных содержит:

- описание объектов, участвующих в процессе тестирования;
- описание сигналов между объектами;
- определение типов и параметров сигналов;
- описание списка тестов;
- данные по настройке инструментов;
- описание цепочек запуска инструментов.

Информация, представленная в модели данных, отображается в графическом интерфейсе, позволяющем анализировать и редактировать данные, необходимые для настройки процесса тестирования.

Технология автоматизации тестирования.

Технология автоматизации, основанная на ис-

пользовании интегрированной среды, состоит из трех этапов:

- конфигурации тестового окружения;
- создании цепочек исполнения инструментов;
- исполнения и анализа тестового набора.

Для удобства использования каждый из этапов реализуется с помощью специализированного пользовательского интерфейса. При этом, что немаловажно, данные по настройке процесса тестирования хранятся в общей модели данных, доступной из любого пользовательского интерфейса.

На первом этапе пользователь создает новую конфигурацию для хранения данных или импортирует уже существующую и на ее основе настраивает тестовое окружение, определяя объекты тести-

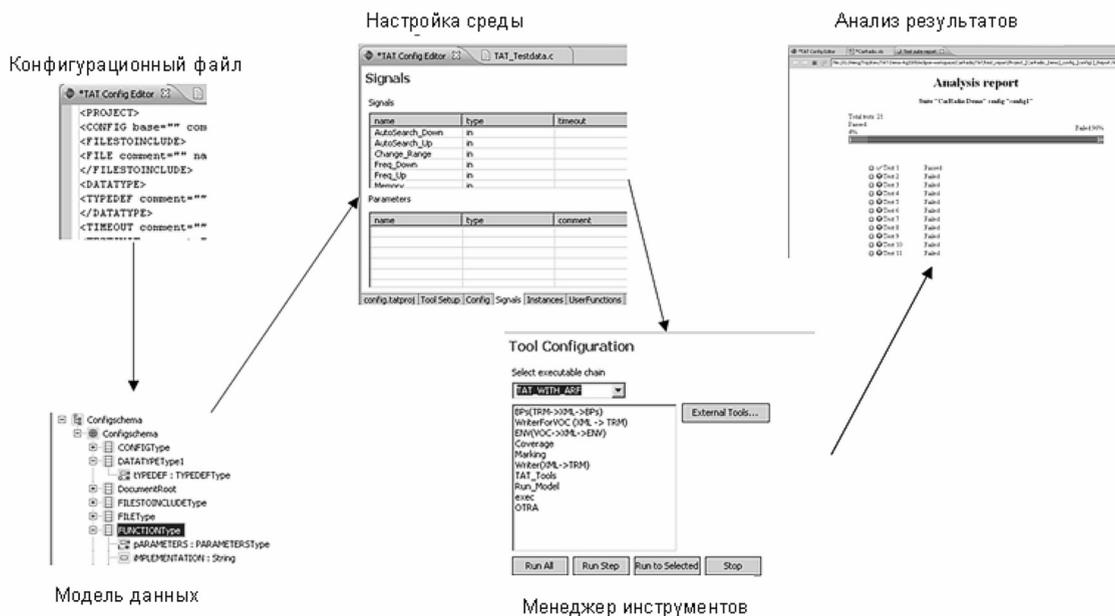


Рис. 2. Технология настройки процесса тестирования

рования и их коммуникационный интерфейс. На втором этапе создается цепочка запуска инструментов, которые проводят подготовку теста к исполнению. На третьем этапе происходит непосредственно исполнение тестов и анализ результатов.

Этапы технологии автоматизации тестирования приведены на рис. 2.

Рассмотрим каждый из представленных этапов более подробно.

Настройка тестового окружения – одна из основных задач в рамках процесса автоматизации тестирования. Рассматриваемая в статье интегрированная среда основана на использовании нотации MSC, с помощью которой пользователь создает тесты. Пример теста приведен на рис. 3.

Основными элементами языка являются сущности (instances), описывающие объект тестирования и тестовое окружение, и сигналы (messages), описывающие воздействия на тестируемую систему и ее отклики. Таким образом, настройка тестового окружения заключается в ассоциации сущностей с реальными объектами и описании сигналов. В данном примере сущность TAT должна быть проассоциирована с системой тестирования, а сущность SUT (System Under Test) с тестовой системой. Пример подобной настройки приведен на рис. 4.

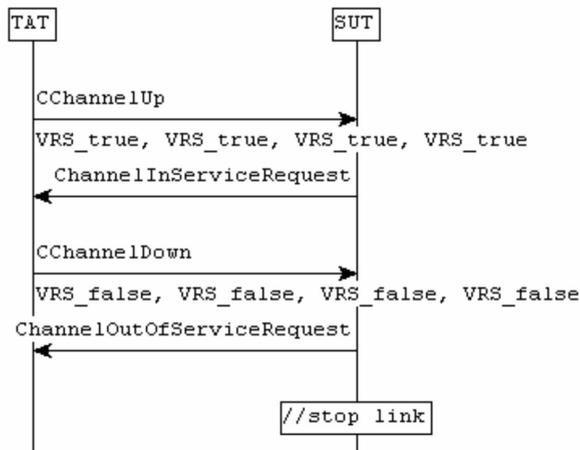


Рис. 3. Тест на языке MSC

В рамках настройки сигналов пользователь должен описать имена и направления сигналов, а также множество параметров сигналов и их типы. Данная информация будет использована системой автоматизации тестирования TAT для генерации коммуникационного модуля, позволяющего отправлять на тестируемую систему воздействия и анализировать ее отклики.

Настройка цепочки исполнения инструментов. Для успешного проведения тестирования пользователю зачастую необходимо провести ряд подготовительных работ. К ним относятся:

удаление из диаграмм тестов избыточной информации;

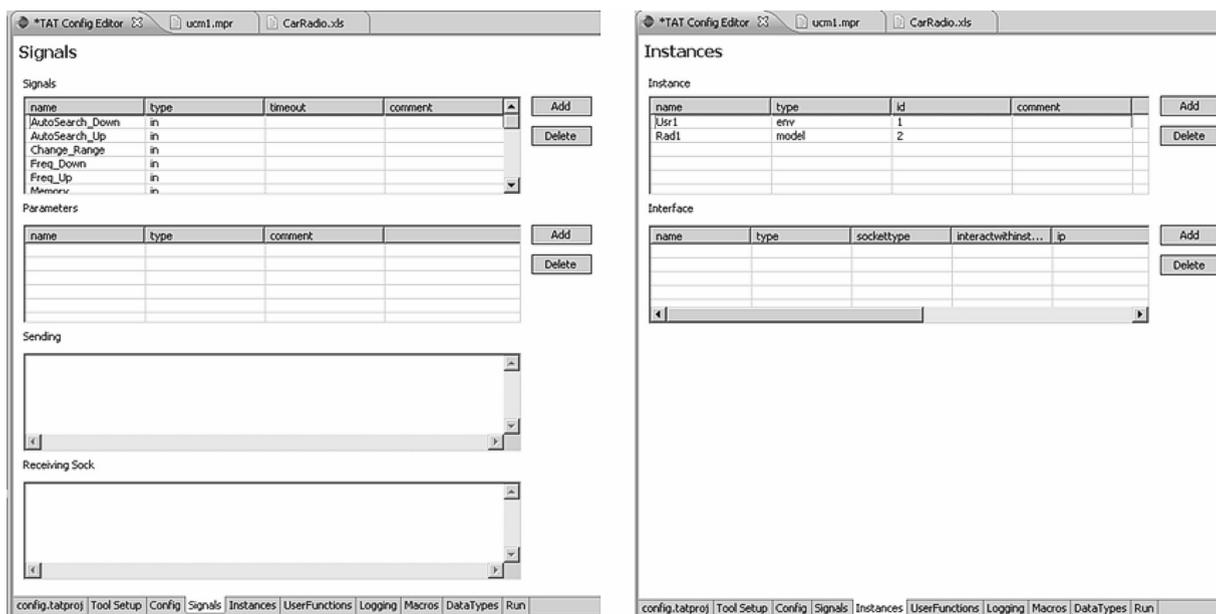


Рис. 4. Настройка сущностей и сигналов

композиция экземпляров;
удаление невидимых сигналов из диаграмм;
добавление конфигурационных сигналов;
инициализация тестового приложения;
генерация дополнительных конфигурационных файлов.

Перечисленные работы полностью автоматизированы с помощью специализированных скриптов.

Однако пользователю важна проблема создания цепочки запуска, т. е. последовательности исполнения инструментов тестирования, которая может быть различной для различных запусков тестового набора. В частности, сама система автоматизации тестирования TAT представляет набор подобных инструментов (модулей):

макропроцессор, позволяющий раскрывать макроподстановки, использованные в диаграммах тестов;

генератор абстрактного тестового набора, преобразующий тест на MSC в промежуточное платформонезависимое представление на скриптовом языке tcl;

кодогенерирующий шаблон, позволяющий получить код теста на целевом языке программирования из промежуточного представления на tcl;

анализатор результатов тестирования, дающий возможность сбора статистики по исполненным тестам.

и др., в т. ч. вновь реализованные или третьесторонние модули

Перечисленные модули служат компонентами процесса автоматизации тестирования и, в зависимости от задач пользователя, могут быть включены или исключены из цепочки автоматизации.

Для решения проблемы создания гибких цепочек запуска в интегрированной среде исполь-

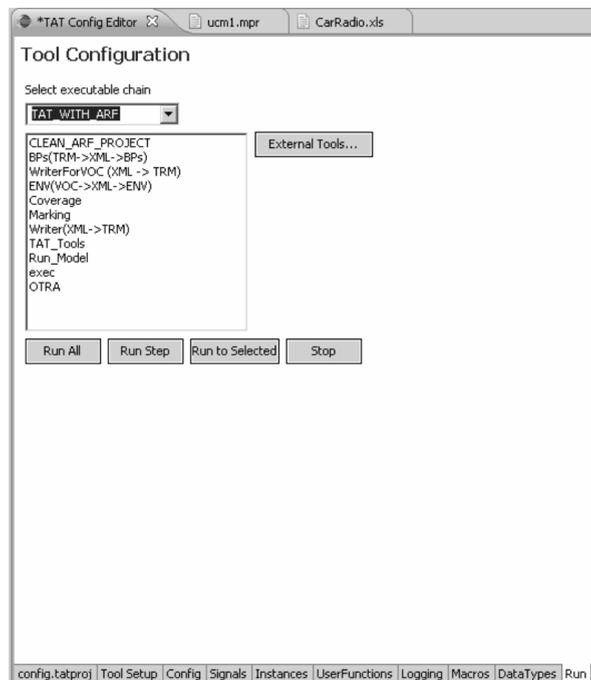


Рис. 5. Запуск цепочки исполнения

зован механизм интеграции (склеивания) различных инструментов в общую последовательность. Пользовательский интерфейс запуска цепочки исполнения представлен на рис. 5. В рамках цепочки исполнения выполняются семь вспомогательных скриптов, затем управление передается на цепочку запуска модулей TAT для генерации теста на целевом языке, после чего происходит исполнение теста и анализ результатов.

При этом пользователь управляет запуском либо всей цепочки, либо ее части, вплоть до отдельного запуска любого из инструментов.

На рис. 6 представлен пользовательский интерфейс создания цепочки.

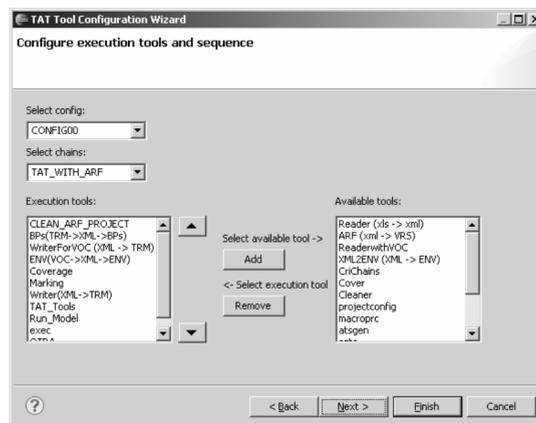
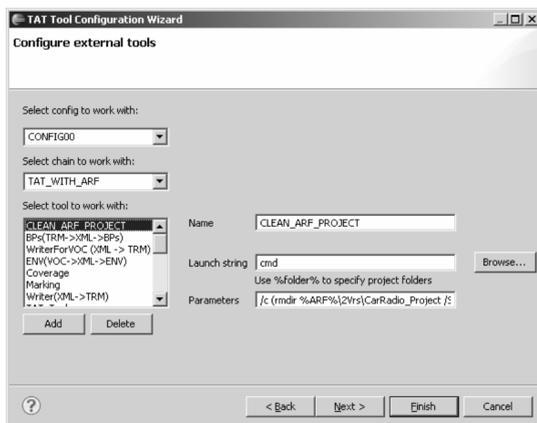


Рис. 6. Настройка цепочки исполнения

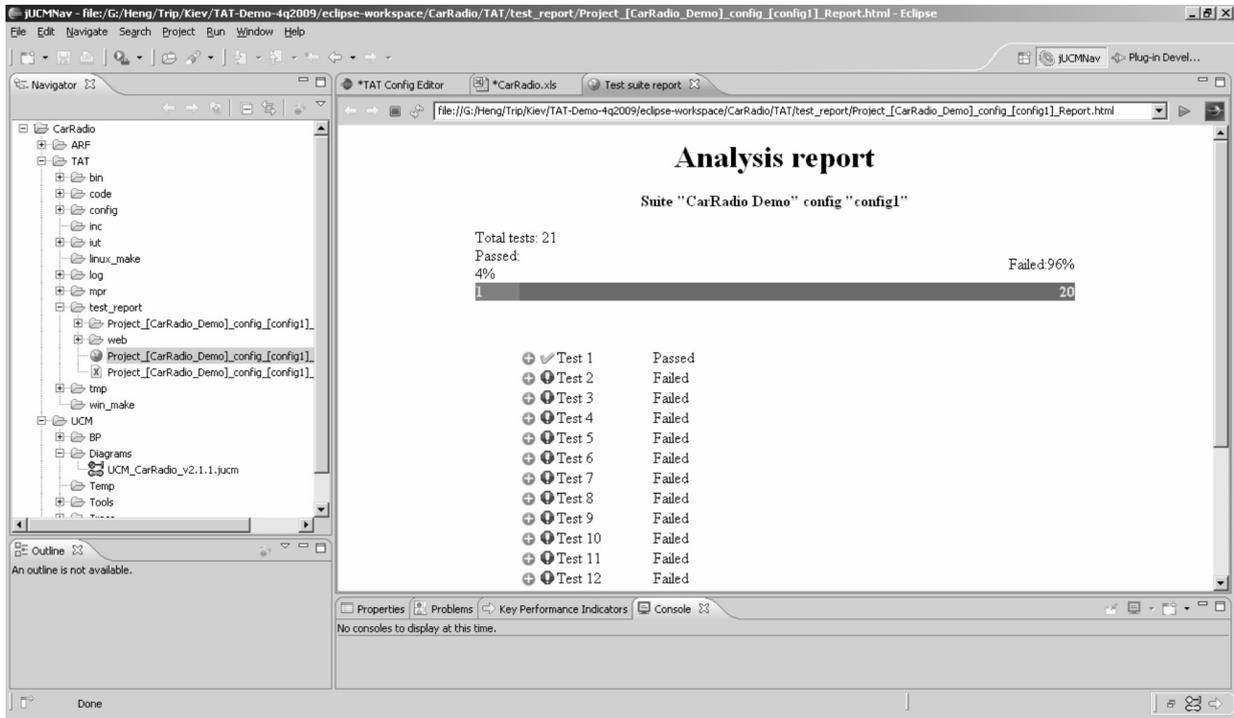


Рис. 7. Пользовательский интерфейс анализа результатов тестирования

В левой части рисунка представлен интерфейс по настройке отдельного инструмента в рамках цепочки. В качестве инструмента может быть использован как модуль системы автоматизации тестирования TAT, так и любой модуль стороннего разработчика.

Для настройки модуля пользователю необходимо указать имя модуля, которое будет использоваться для его идентификации в рамках цепочки, строку запуска, указывающую на расположение модуля и входные параметры, позволяющие его сконфигурировать. В правой части рисунка представлен интерфейс формирования цепочки. В рамках данного интерфейса пользователь может выбрать модуль из множества настроенных в системе модулей и добавить его в цепочку.

В интегрированной среде автоматизации пользователю предоставляется возможность:

перегруппировки моделей в рамках цепочки, что позволяет изменить последовательность их исполнения;

создания подцепочек, что дает возможность вторично использовать уже созданные цепочки.

Исполнение и анализ тестового набора. Исполнение тестового набора происходит на основе созданных цепочек. После предварительной об-

работки тестов и их генерации на целевой язык проводится компиляция тестового набора и его запуск. В результате запуска генерируется набор лог-файлов, которые облегчают пользователю анализ результатов. На рис. 7 изображен интерфейс, предоставляемый средой автоматизации тестирования для анализа результатов исполнения тестов.

В рамках данного интерфейса пользователь получает возможность просмотра статистики результатов проведенного тестирования, а также возможность анализа результатов каждого теста как в текстовом, так и в графическом (на MSC диаграмм) виде.

Представленная в статье интегрированная среда автоматизации тестирования на основе eclipse была апробирована в трех проектах из телекоммуникационной сферы. Результаты апробации показали, что использование среды позволяет существенно сократить время на настройку и адаптацию тестового набора, а также облегчить процесс анализа результатов исполнения тестового набора. Так, например, для тестового проекта CDMA было получено 20 % сокращение затрат на настройку тестового окружения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Котляров, В.** Основы современного тестирования программного обеспечения, разработанного на С# [Текст]/В. Котляров, Т. Коликова.
2. UML Distilled Second Edition A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language [Электронный ресурс].
3. ITU Recommendation Z.120. Message Sequence Charts (MSC), 11/99 [Электронный ресурс].
4. Telelogic Tau TTCN Suite [Электронный ресурс] <http://www.telelogic.com/products/tau/ttcn/index.cfm>
5. T-VEC Technologies [Электронный ресурс] <http://www.t-vec.com/Home.asp>
6. ISP RAS Red Verst [Электронный ресурс] <http://www.ispras.ru/~RedVerst>
7. Conformiq Software Ltd. [Электронный ресурс] <http://www.conformiq.com/products.html>
8. **Веселов, А.О.** Автоматизация тестирования телекоммуникационных приложений [Текст]/А.О. Веселов, А.С. Иванов, Б.В. Тютин, В.П. Котляров//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 3.

УДК 004.415

*И.В. Никифоров, А.В. Петров, Ю.В. Юсупов***ГЕНЕРАЦИЯ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
ПО ТРЕБОВАНИЯМ, ЗАДАНЫМ В НОТАЦИИ USE CASE MAP**

Разработка программного продукта начинается с анализа требований, которым должна удовлетворять система, поскольку они разрабатываются вручную и им свойственны противоречивость, неполнота, недостаточная детальность и т. п. Для того чтобы на этапе проектирования требований более точно понять, как должна работать система, необходимо использовать описание архитектуры и поведения системы через диаграммы вариантов использования (UCM – Use Case Maps).

Формализуя высокоуровневый дизайн программной системы в нотации UCM, в результате получаем ее модель на формальном языке. Формальная модель позволяет применить математический аппарат верификации, получить спектр моделей различной детальности в процессе уточнений, а также имеется возможность автоматической генерации исполняемого кода из модели.

Верификация позволяет осуществить проверку корректности, полноты и непротиворечивости требований до этапа автоматической кодогенерации, что существенно снижает стоимость создания корректной исполнимой модели проектируемой системы.

В качестве языка описания формальной модели была выбрана нотация базовых протоколов,

используемая в теории взаимодействующих агентов и сред [1] для спецификации их поведения с помощью элементарных MSC диаграмм.

В статье описаны особенности использования языка UCM на этапе архитектурного описания проектируемой системы, автоматический переход от нотации UCM к формальной модели в виде базовых протоколов, средства проверки простых ошибок и описок ручной формализации, а также результаты применения разработанного подхода к разработке реальных проектов.

Use Case Maps

Варианты использования – это описание последовательности действий, которые может производить система в ответ на внешние воздействия пользователей или программных систем (компонентов). Варианты использования отражают функциональность системы с точки зрения описания архитектуры системы. Их применение приносит важные составляющие в процесс разработки программных систем [2]:

заполняет промежуток между словесным описанием требований и детальным дизайном системы; позволяет разработать архитектуру системы на высоком уровне абстракции, а также за-

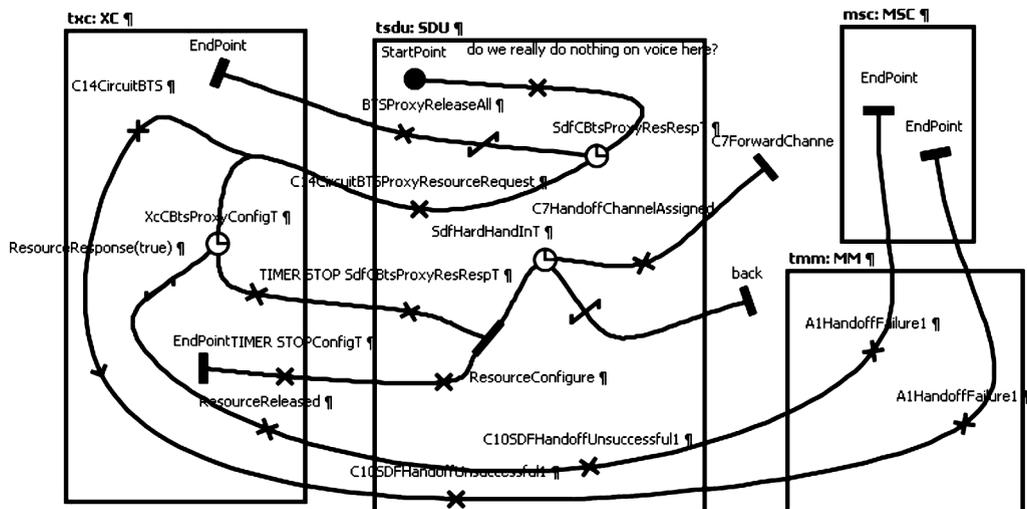


Рис. 1. UCM диаграмма

дать поведение системы, когда архитектура уже определена;

помогает разработчику предсказывать поведение сложных систем;

предоставляет удобную нотацию, позволяющую изображать на диаграмме параллельные структуры, таймера, точки прерывания, использовать аспекты.

Дизайн системы в нотации UCM представляет набор взаимодействующих между собой диаграмм. В свою очередь каждая из диаграмм сосредоточена на описании взаимодействия компонентов (агентов, процессов системы), объектов, наблюдателей и подсистем. Каждый компонент и подсистема содержит в себе элементы ответственности (Responsibilities), соответствующие некоторым событиям в системе, а также строгую последовательность их возникновения. Таким образом, совокупность компонентов и диаграмм дает пользователю наглядное представление о поведении системы и взаимодействии между ее компонентами.

Разработка UCM диаграмм осуществляется с использованием графического редактора UCM Navigator [3]. На рис. 1 приведен фрагмент UCM диаграммы для реального проекта из области телекоммуникаций, на котором показано взаимодействие четырех компонентов, изображенных прямоугольниками. Сценарий взаимодействия обозначен линиями и различными элементами (например, Responsibility, Timer), порядок следования которых определен направленностью линий.

Когда диаграмма, изображающая поведение системы или ее фрагмента, становится сложной для понимания, используется механизм структурирования диаграмм с помощью элементов Stub (контейнер). Верхний уровень UCM рассматривается как корневая диаграмма, которая может содержать контейнеры для поддиаграмм (plugins). Элемент Stub изображается на диаграмме ромбом, который может иметь несколько входов (линий, входящих в Stub) и выходов (линий, выходящих из Stub). На рис. 2 приведена UCM диаграмма с элементом Stub (имя «voice 2»), имеющим один вход и два выхода.

Использование элемента Stub – это способ добавления различных уровней абстракции в модели, что позволяет при необходимости изучать систему на высоком уровне абстракции, не вдаваясь в детальное описание ее компонентов.

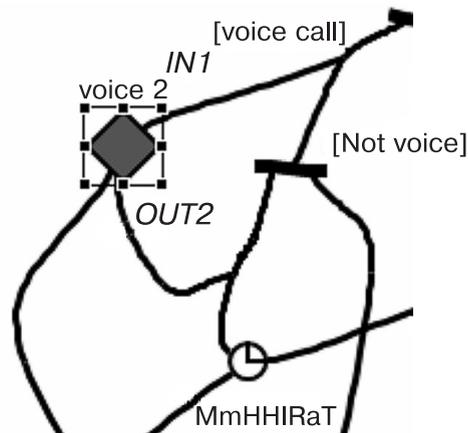


Рис. 2. UCM диаграмма с элементом Stub

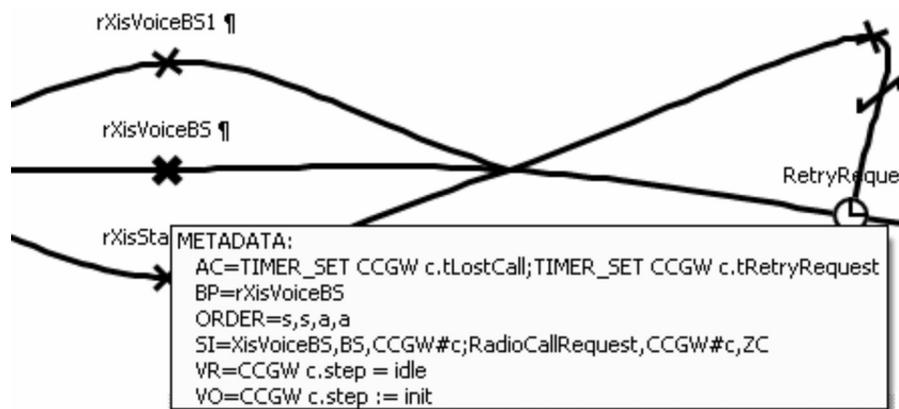


Рис. 3. Метаданные для UCM элемента

Разработанный подход к формализации поведения систем основан на использовании метаданных, которые могут быть добавлены практически на все элементы проекта (Responsibility, Timer, Start Point, End Point, Map и т. д.). Использование этих полей позволяет перенести всю необходимую информацию из требований в UCM дизайн. В метаданные можно помещать дополнительную информацию о самом элементе, его описание, характеристики и маркированный текст, необходимый для процесса формализации.

Метаданные представляют собой неограниченный набор данных формата: «Имя переменной» – «Значение переменной», где каждое имя соответствует определенному типу информации. Например, имя «SI» соответствует описанию сигнала, имя «AC» соответствует описанию действия.

Формализация

Для автоматического перехода от высокоуровневого дизайна, заданного в нотации UCM, к формальному описанию в виде базовых протоколов, используется инструмент UCM2BP [4]. Инструмент поддерживает несколько форматов экспорта, позволяя гибко управлять этим процессом: базовые протоколы [1], MSC диаграммы и табличное представление.

Базовые протоколы. В этом режиме кроме множества базовых протоколов осуществляется генерация трех конфигурационных файлов:

- файл окружения, содержащий описание агентов и атрибутов с указанием их начальных значений, а также процессов, участвующих в системе;
- файл описания сигналов системы;
- файл с описанием фильтров, задающих параметры по умолчанию для верификации.

Модель на основе базовых протоколов или VRS проект – исходные данные для верификации – загружается в VRS Client [5]. VRS Client является графическим средством для работы с базовыми протоколами и конфигурационными файлами. Он также обеспечивает запуск и управление системой автоматизированной верификации.

Для больших проектов, описываемых множеством UCM файлов, существует возможность генерации единого структурированного множества базовых протоколов и объединенных конфигурационных файлов.

MSC диаграммы. MSC диаграммы, получаемые по UCM проекту, используются для генерации эвристик (правил генерации сценариев). Автоматически сгенерированные эвристики используются VRS в процессе генерации поведенческих сценариев или трасс. Поскольку процесс генерации трасс связан с взрывом вариантов и может даже для систем среднего размера занимать десятки часов, применение эвристик сокращает время генерации на порядки.

Табличное представление. Этот выходной формат является табличным представлением основных частей базового протокола, используемого в метаданных. Набор специальных маркеров используется в метаданных для выделения пред- и постусловий, сообщений, действий и т. д. Данное табличное представление множества базовых протоколов используется инструментом ARF Tool [6], позволяющим провести ряд проверок формализации. Результатом проведения проверок является обнаружение и исправление простых ошибок и описок, внесенных в ходе создания формальной модели по текстовому описанию требований. Например, таким способом

можно определить дублирование описаний, нехватку информации в описании объекта, использование разных имен для описания одного и того же объекта и т. п.

Важно отметить, что при переходе от высокоуровневого дизайна в нотации UCM к формальному описанию в виде базовых протоколов, вся информация из метаданных и комментариев, помещенных на элементы диаграмм, используется при построении соответствующих частей базовых протоколов. Таким образом, в формальной модели системы в виде VRS проекта сохраняются все ее свойства, заданные разработчиком на этапе создания UCM проекта.

Проверки

Система ARF Tool осуществляет проверки по табличному представлению UCM проекта, содержащее описание требований в виде таблицы, где компоненты требований классифицированы. Таблица (рис. 4) имеет относительно свободный формат, однако, в ней выделены специальные (обязательные) колонки, в которые заносится информация, извлекаемая из текста требований или UCM проекта. В колонках табличного представления формализуемого требования выделяются используемые переменные состояния, описание которых содержится в таблице специального формата – онтологии (словаре переменных).

Документы, содержащие требования к проекту, могут быть достаточно объемными и со-

держат тысячи, а иногда и десятки тысяч требований. В таких случаях анализ и формализация требований осуществляется по частям (разделам) разными группами инженеров. Табличное представление позволяет проводить объединение результатов без особых проблем. Однако важной задачей при этом становится проверка общего документа на наличие в нем ошибок следующих видов: одинаковые имена базовых протоколов и переменных или наоборот, различные имена переменных, формализующих одни и те же параметры и т. п. Такого рода ошибки необходимо выявлять и исправлять на ранних стадиях проектирования, поскольку от их наличия зависят крайне важные свойства модели, такие, как корректность, полнота и адекватность.

Результаты

Приведенный в данной статье подход к автоматической формализации требований, заданных в нотации UCM, был успешно применен в трех проектах из области телекоммуникации.

Результаты, полученные на основе пилотирования, позволили сократить время формализации требований в два раза по сравнению с ручным подходом.

Использование на фазе дизайна UCM нотации позволяет создать адекватные требованиям архитектурные модели разрабатываемых систем, а затем, на основе полученных моделей, сгенери-

ID	Identifier	Requirements	Scenario of requirements	Scenario ID	Traceability	References	Traces	Order	SFRReq	FReq	Name	PRE	ACT	SI	POST	DIR	Comment	Error	
5	RAD.02	Pressing the button Off turns radio off	1. Press Off button 2. Check that the Radio is now switched-off	scw02	RAD.02 Req_RadOff Res_RadOff				SBPReq_RadOff SAGRad, Radio SFRIdle SVR(power="on") SSI TurnOff, User#User, Radio SPOOffOn SBPReqOff SAGRad, Radio SFROffOn SACRadio Off SPOOffO SVO(power="off");(memory:symb="off");(autosearch:symb="off")										
6																			
7																			
8		2 Volume control						P	Volume										
	RAD.03	The minimal volume level is 0 units. The maximal volume level is 20 units. The minimal stride for changing the volume level is 1 unit.							min_vol_lev = 0 max_vol_lev = 20 vol_ch_val = 1										
	RAD.04	After the radio is switched on, the volume level is 5 units							init_vol_lev = 5										
9	RAD.05	When the volume decrease button is pressed, the volume level is decreased at the minimal stride for changing the volume level.	1. Press the volume decrease button. 2. Check that the volume decreased at the minimal stride value.	scw03	RAD.05 Req_VolDown Res_VolDown				SBPReq_VolDown SAGRad, Radio SFRIdle SSI Volume_Down, User#User, Radio SPOVolDown SBPVolDown_Ch SAGRad, Radio SFRVolDown SVR(vol:ini:min_vol_lev:int) SACVolume: down SPOVoid SVO(vol=vol-vol_ch_val:int) SBPReq_VolDown SAGRad, Radio SFRVoid SSI Confirm_Volume_Down, Radio, User#User SPOIdle										
10																			
11																			

Рис. 4. Пример табличного формата представления требований



ровать спектр более детализированных моделей, на основе которого сгенерировать исполняемые модели и прототипы реальных систем телекоммуникационных приложений.

Предлагаемый подход позволяет также выявить и исправить некоторые классы ошибок, недостатков и некорректностей в исходных требованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Летичевский, А.А.** Спецификация систем с помощью базовых протоколов [Текст]/А.А. Летичевский, Ю.В. Капитонова, А.А. Летичевский (мл.) [и др.]//Кибернетика и системный анализ.–2005.–№ 4.–С. 3-21

2. **Buhr, R.J.A.** Use Case Maps for Object-Oriented Systems [Текст]/R.J.A. Buhr, R.S. Casselman. –Prentice Hall, 1995.

3. Use Case Map Navigator [Электронный ресурс] <http://jucmnav.softwareengineering.ca>

4. **Никифоров, И.В.** Использование Use Case Map в современной технологической цепочке разработки программного обеспечения [Текст]/И.В. Никифоров, Ю.В. Юсупов//XXXVIII Неделя

науки СПбГПУ. Матер. межвуз. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та.–2009.–С. 92–93.

5. **Letichevsky, A.** Basic Protocols, Message Sequence Charts, and the Verification of Requirements Specifications [Текст]/A. Letichevsky, J. Kapitonova, A.(Jr). Letichevsky [et al.]//ISSRE 2004, Workshop on Integrated reliability with Telecommunications and UML Languages, Rennes. –4 Nov. 2005. –P. 30–38.

6. **Котляров, В.П.** Автоматизация формализации требований программного проекта [Текст]/В.П. Котляров, А.В. Петров//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 3.–С. 236–241.

УДК 004.415

М.Ш. Даишев, Л.П. Котлярова

МЕТОДИКА ОТЛАДКИ НА ОСНОВЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАССЫ ИСПОЛНЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ НА ЯЗЫКЕ JAVA

Разработчики программного обеспечения тратят много времени, пытаясь воспроизвести дефекты, возникающие в ходе нефункционального тестирования, тестирования в реальном окружении или в уже изданном программном продукте. Основная сложность отладки таких дефектов заключается в необходимости воспроизведения дефекта в окружении разработчика. В нефункциональном тестировании часто возникает ситуация, когда дефект возникает только после нескольких дней устойчивой работы приложения. Обычно такие проблемы принято решать добавлением многоуровневого логирования, которое позволяет получить некоторую информацию о сбое. Однако часто подобная схема не срабатывает по причине недостатка отладочной информации, или из-за прекращения воспроизводимости дефекта, или из-за существенного увеличения времени до по-

явления дефекта. Во встроенном программном обеспечении с ограниченными ресурсами исправление подобных дефектов может растягиваться на недели.

Большинство известных систем отладки базируется на сохранении содержимого оперативной памяти (core dump) [1, 2], представляющего собой финальное состояние системы перед сбоем. К сожалению, подобного решения недостаточно, поскольку сложно определить основную причину дефекта.

Одно из решений данной проблемы – создание системы, которая позволит сохранять поток управления приложения (трассу) в условиях, где дефект повторяется, и впоследствии восстанавливать состояние системы, на момент появления дефекта в окружении разработчика.

Система, рассматриваемая в статье, основана на анализе сохраненной трассы и для удобства отладки включает в себя инструментарий построения статического дерева зависимостей и механизм динамического разбиения исходного кода приложения (dynamic slicing method)[3].

Несмотря на существование инструментов отладки и трассировки со схожей функциональностью [4], можно выделить несколько серьезных проблем.

Во-первых, большинство систем основывается на периодическом сохранении состояния оперативной памяти, что требует выделения большого количества памяти. Особенно актуальна данная проблема для случая нефункционального тестирования, когда цикл тестирования может продолжаться несколько дней.

Во-вторых, такие системы часто некорректно работают с многопоточными приложениями, что существенно ограничивает их применение для Java- программирования.

В данной работе представлена методика автоматизации получения трасс выполнения приложения и отладки, с использованием методов динамического разбиения программного кода приложения.

Общая архитектура системы

Рассматриваемая система представляет собой инструментарий, позволяющий сохранять трассу исполнения приложения и выполнять удаленную отладку на исходном коде приложения (рис. 1). Каждый из этих инструментов отвечает за определенные преобразования входных данных, заданных исходным кодом. Модульность построения системы допускает как самостоятель-

ное использование отдельных подсистем, так и их произвольные комбинации, диктуемые проектной необходимостью.

В состав системы входят следующие инструменты:

- статический анализатор кода;
- модуль логирования;
- модуль отладки.

Рассмотрим более подробно функциональность каждого из модулей.

Статический анализатор кода осуществляет анализ и проверку исходного кода для оптимизации работы модуля логирования и сокращения размера трассы. В ходе анализа выполняются следующие операции:

- проверка и поиск наличия недостижимого кода;
- анализ неиспользуемых локальных переменных, параметров, private-методов;
- поиск и маркировка конструкций ввода-вывода (файловые, сокет, сетевые операции) для последующего сохранения данных и подачи на вход модуля отладки;
- поиск и маркировка java-интерфейсов внешних библиотек;
- построение и маркировка дерева зависимостей методов для определения линейных последовательностей вызова методов (inline chains);
- вычисление метрик сложности кода для оптимизации использования механизма контрольных точек.

Модуль логирования подключается к виртуальной машине Java (JVM) с помощью интерфейсов JPDA и JVM Tool Interface и используется для сохранения потока управления (трассы) [5]. Схема подключения к виртуальной машине Java представлена на рис. 2.

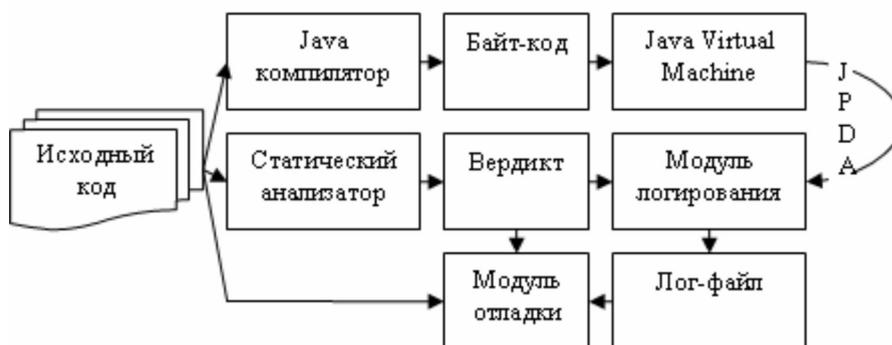


Рис. 1. Общая архитектура системы

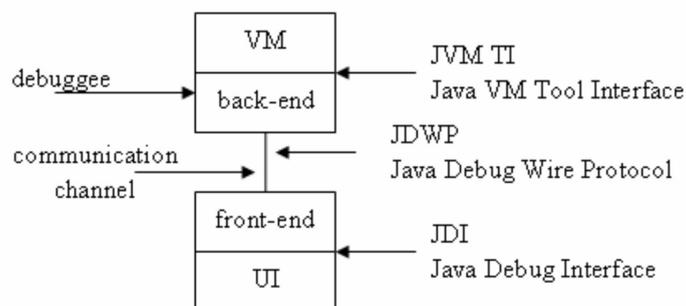


Рис. 2. Схема подключения к виртуальной машине Java

Простейшим способом построения трассы приложения является сохранение последовательности всех исполненных инструкций. В Java имеет смысл рассматривать инструкции как последовательность байт-кодов, что обеспечивает совместимость со сторонними библиотеками, исходный код которых может быть недоступен. Впоследствии, при отладке, инструкциям можно поставить в соответствие конструкции языка Java. Подобные методы обладают существенным недостатком: при длительной работе приложения существенно увеличивается конечный размер трассы [6].

В данной работе рассматривается один из возможных методов минимизации размера трассы. Трасса представляет собой последовательность вызовов методов, создания объектов, операций выделения памяти. Необходимо отслеживать следующие типы инструкций:

- Выделения памяти, для отслеживания моментов создания экземпляров объектов.
- Доступа к памяти. Байт-коды, описывающие обращение к элементам массива или полям объекта. Сохраняется указатель на элемент объекта и идентификатор поля.
- Вызова методов. В языке Java определено четыре кода вызова методов: `invokespecial`, `invokestatic`, `invokeinterface`, `invokevirtual`. Первые два не нуждаются в трассировке, т. к. информация о вызываемых методах может быть получена из исходного кода. Оставшиеся являются кодами вызова виртуальных методов или интерфейсов, что означает, что конкретная реализация вызываемого метода становится известна только при исполнении приложения.
- Инструкции, у которых более одного предшественника в графе потока управления. Для таких инструкций записывается и предшествующий байт-код.

- Возврата значения и передачи управления. Если в методе существует более одной операции возврата, в трассу записывается конкретная сработавшая инструкция.

На основе информации, полученной статическим анализатором для каждого метода или линейной последовательности, создается таблица вызовов. Вызовы методов и возвращаемое значение методов определяется на основе статического анализа и соответствующих байт-кодов. Каждый ряд в таблице представляет собой последовательность изменений во времени для отдельной инструкции метода в зависимости от состояния системы и входных параметров. Представим пример таблицы для метода `foo()`.

В левой части таблицы находится исходный код на языке Java, в правой – соответствующий ему байт-код, а в нижней части представлена таблица трасс для приведенного фрагмента кода.

Для обеспечения работы с окружением операционной системы (файловая система, сетевые соединения) был разработан модуль, сохраняющий данные из потоков записи/чтения (стандартные средства языка Java) и использующий их в цикле отладки. Для каждого из потоков сохраняется:

идентификатор потока;

для файлов и интернет-соединений – адрес на виртуальной файловой системе или адрес сервера; атомарные операции записи/чтения из потока с соответствующими задержками между ними.

Конечный лог-файл для оптимизации размера архивируется алгоритмами словарного сжатия данных.

Модуль отладки принимает на вход исходные файлы Java и трассу, содержащую описание последовательности вызовов методов. Для удобства отладки трасса разбивается на равные интервалы (по времени или по количеству инструкций).

Исходный код на языке Java и трасса из таблиц вызовов

<pre> public int foo(int num){ int result; int tmp[] = new int[4]; if(num>10){ result = 100; }else{ result = 1; } return result; } private void doStuff(){ Demo demo = new Demo(); demo.foo(10); demo.foo(11); demo.foo(10); } </pre>	<pre> 0: iconst_4 1: newarray int 3: astore_3 4: iload_1 5: bipush 10 7: if_icmple 16: 10: bipush 100 12: istore_2 13: goto 18 16: iconst_1 17: istore_2 18: iload_2 19: ireturn ----- 0: new #2; //class Demo 3: dup 7: astore_1 8: aload_1 9: bipush 10 11: invokevirtual foo:(II) 14: pop 15: aload_1 16: bipush 11 18: invokevirtual foo:(II) 21: pop 22: aload_1 23: bipush 10 25: invokevirtual foo:(II) 28: pop </pre>								
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <th colspan="2">Таблица байт-кодов метода doStuff()</th> </tr> <tr> <th>Байт-код</th> <th>Последовательности</th> </tr> <tr> <td>0</td> <td><Obj1></td> </tr> <tr> <td>11,18,25</td> <td><Obj1.foo()></td> </tr> </table>		Таблица байт-кодов метода doStuff()		Байт-код	Последовательности	0	<Obj1>	11,18,25	<Obj1.foo()>
Таблица байт-кодов метода doStuff()									
Байт-код	Последовательности								
0	<Obj1>								
11,18,25	<Obj1.foo()>								
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <th colspan="2">Таблица байт-кодов метода foo()</th> </tr> <tr> <th>Байт-код</th> <th>Последовательности</th> </tr> <tr> <td>18</td> <td>17,13,17</td> </tr> </table>		Таблица байт-кодов метода foo()		Байт-код	Последовательности	18	17,13,17		
Таблица байт-кодов метода foo()									
Байт-код	Последовательности								
18	17,13,17								

На основе исходного кода система восстанавливает значения параметров и вызовов методов, которые были сохранены в трассе, и вычисляет значения локальных переменных, которые не были

сохранены. При цикле отладки для программиста бывает необходимо быстро переходить вверх или вниз по стеку вызовов методов или переходить по трассе выполнения на временные метки в «про-

<pre> int i; int sum = 0; int product = 1; for(i = 0; i < N; ++i) { sum = sum + i; product = product * i; } write(sum); write(product); </pre>	<pre> int i; int sum = 0; for(i = 0; i < N; ++i) { sum = sum + i; } write(sum); </pre>
---	---

Рис. 3. Разбиение по критерию (write(sum), {sum}), слева – исходный код, справа – код после разбиения

шное» или «будущее». Это возможно благодаря использованию табличной организации трассы.

Для удобства отладки и локализации дефектов реализована следующая технология разбиения исходного кода приложения [3]. Возьмем программу P . Программист задает критерий разбиения в виде (l, V) , где l – исследуемая команда в исходном коде; V – множество исследуемых переменных в l . Задачей разбиения является поиск инструкций в P , которые могут повлиять на значения V в l в результате переходов потоков управления или потоков данных. Таким образом, если во время исполнения разработчик понимает, что значению V в l присвоено непредвиденное значение, то анализ соответствующего блока разбиения может объяснить причину возникновения такой ситуации. Пример алгоритма работы разбиения по критерию (write(sum), {sum}) представлен на рис. 3.

Технологии разбиения разделены на две категории: статические и динамические. Статические методы вычисляют фрагмент, влияющий на значения V без учета специфики исполнения при-

ложения. Поэтому при одном и том же критерии разбиения блок, полученный динамическим способом, будет меньше статического.

С другой стороны, динамическое разбиение вычисляется на основе трассы работы приложения, и блоки разбиения оказываются намного точнее и более полезны для разработчика, который занимается отладкой приложения.

Представленная в статье технология компактного сохранения трассы Java приложения для последующего цикла удаленной отладки позволяет значительно снизить трудоемкость анализа и сэкономить время на исправление дефектов, возникающих при нефункциональных видах тестирования. При незначительных расширениях функциональности систему можно использовать как полноценный java-профайлер с расширенным набором функциональности для поиска и отладки дефектов. Преимущества описанных методик были доказаны в ходе их применения в ряде проектов по разработке встроенного программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microsoft Corporation. Dr. Watson overview [Электронный ресурс] <http://oca.microsoft.com/en/dcp20.asp>
2. Netscape Communications Corp. Netscape quality feedback system [Электронный ресурс] <http://wp.netscape.com/>
3. **Weiser, Mark** Program slicing [Текст]/Mark Weiser//IEEE Transactions on Software Engineering.– Jul. 1984.–Vol. 10.–Iss. 4.–P. 352–357.
4. Indus project [Электронный ресурс] <http://projects.cis.ksu.edu/gf/project/indus/>
5. JDPА, JVM Tool Interface reference [Электронный ресурс] <http://java.sun.com/javase/6/>
6. **Elnozahy, E.N.** A survey of rollback-recovery protocols in message-passing systems [Текст]/E.N. Elnozahy, L. Alvisi, Y. Wang [et al.]//ACM Computing Survey. –2002.–34(3). –P. 375–408.

ПРОТОТИП ЭВРИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Рост пропускной способности современных компьютерных сетей предъявляет повышенные требования к системам их защиты. Системы обнаружения вторжений должны обладать возможностью работать на мегабитных и гигабитных линиях. Эта возможность определяется показателем PPs (Packet per second – максимальное количество пакетов, которое система может обработать за 1 с на этапе тестирования), который приобретает решающее значение в оценке применимости системы в реальных условиях. В связи с этим проектирование систем обнаружения вторжений должно базироваться на использовании новых методов, таких, как применение GPU (Graphic Processor Unit), быстрые алгоритмы преобразования трафика, методы сокращения размерности пространства данных и др. В данной статье предложен прототип системы обнаружения, использующий некоторые из вышеперечисленных решений проблемы производительности.

Архитектура современной эвристической системы обнаружения вторжений. Механизм работы системы (HNIDS – Heuristic Network Intrusion Detection Systems) состоит из двух этапов: обучения и тестирования. На этапе *обучения* система накапливает трафик в специальном хранилище, после чего преобразует его в набор векторов признаков, а затем обучается на полученной выборке. В результате обучения вырабатываются некоторые закономерности в поведении сети. На этапе *тестирования* система просматривает проходящие пакеты, преобразуя их в векторы в реальном времени, и сравнивает их с выработанными закономерностями. Если обнаружено несоответствие, то принимается решение о вторжении в сеть и объявляется тревога.

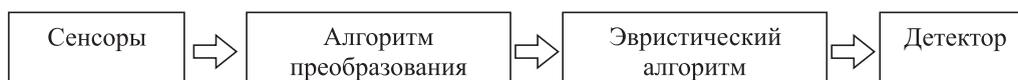
Архитектура такой системы представлена на рисунке.

С помощью сенсоров система захватывает пакеты из сети. Алгоритм преобразования выработывает набор векторов на основании полученных от сенсоров данных о трафике. В качестве эвристического алгоритма могут выступать алгоритм, основанный на методе Data Mining, статистический алгоритм, нейронная сеть или некая комбинация всего перечисленного. Детектор обрабатывает информацию, полученную от эвристического алгоритма, и принимает решение об аномальности того или иного пакета.

Достоинствами таких HNIDS являются возможность обнаружения аномалий, обусловленных даже неизвестными атаками, сбоями в работе сети, а также слабая зависимость времени работы от объема базы знаний системы.

Алгоритм преобразования пакетов в наборы векторов отвечает за конвертацию пакетов в набор векторов, пригодных для дальнейшего обучения/тестирования.

При разработке любой HNIDS необходимо определиться с уровнями модели OSI, на которых будет осуществляться обнаружение вторжений. В общем случае выделяют два типа систем обнаружения вторжений – на *сетевом/транспортном* уровнях и на *прикладном* уровне. Системы прикладного уровня анализируют информацию, содержащуюся в управляющих полях протоколов седьмого уровня, а также непосредственно в полях данных этих протоколов. Такие системы предназначены для обнаружения атак на Web-сервисы, файловые серверы и др. Системы обнаружения вторжений на сетевом/транспортном уровнях работают с полями пакетов протоколов IP, ICMP, UDP и TCP. Такие системы предназначены для обнаружения распределенных атак, отказов в обслуживании, сетевых сканирований, аномалий в поведении узлов и др. Предлагаемый нами прототип представляет систему второго типа.



Ниже представлена информация, которая извлекается алгоритмом из полей протоколов 3–4 уровней модели OSI:

тип протокола транспортного или сетевого уровня;

флаги и опции IP, время жизни, тип сервиса; количество отправленных и принятых байт в сессии;

сервис (для TCP и UDP представляет из себя порт сервера) и land (флаг, установленный в 1 если порт сервера и клиента в рассматриваемом пакете/сессии совпадают), код и тип сообщения ICMP;

корректность контрольной суммы пакета; является ли пакет ширококестельным или групповым.

Отдельно выделим информацию, которая извлекается только из сессий TCP:

флаги TCP;

«отпечаток» операционной системы;

количество пакетов и время сессии;

отношение отправленных/принятых байт к их общему количеству;

опции TCP;

количество изменений окна;

нулевое значение последовательности;

количество соединений с сервером на момент начала сессии.

Как видно, реализуются два типа обработчиков пакетов – для IP/ICMP/UDP пакетов и для TCP-сессий. Это связано с тем, что не имеет смысла рассматривать пакеты TCP отдельно, т. к. большинство атак на транспортном уровне так или иначе используют наборы из пакетов TCP. Аналогичное утверждение справедливо и для UDP, но на 3/4 уровнях модели OSI невозможно достоверно определить конкретную сессию для того или иного пакета UDP, не имея сенсоров, непосредственно установленных на получателе пакета. Это утверждение становится понятным, если рассмотреть случай множественных SMB-запросов к одному серверу.

Определим понятие сессии: сессией называется любая последовательность TCP-сегментов между двумя оконечными точками вида (хост, порт). Такая последовательность может быть ограничена сверху по количеству пакетов и/или времени сессии. Сессия считается завершенной, если получена стандартная последовательность успешного завершения TCP-соединения (получена последовательность сегментов с флагами

FIN, FIN, ACK или FIN, ACK, FIN, ACK) или признак завершения соединения по ошибке (получен флаг RST).

Важными параметрами, влияющими на обнаружение аномалий, являются максимальное количество сегментов в сессии и максимальная продолжительность сессии. Увеличение этих параметров приводит к более точному отображению сессии в вектор, при этом значительно увеличиваются требования к памяти и процессорному времени. Ниже при описании алгоритма показано, почему так происходит.

Поля (элементы) вектора, кодирующего пакет или сессию, могут быть трех типов: булев – принимает значение 0 или 1, дискретный – принимает дискретное значение в заданном диапазоне, числовой – может принимать любое числовое значение. Например, кодирование происходит в порядке появления сервиса в трафике сети, т. е. первый встретившийся системе сервис, вне зависимости от номера его порта, будет кодирован как 1. Так как количество сервисов ограничено, такое кодирование легко реализовать с помощью двух массивов (для TCP и UDP происходит отдельное кодирование сервиса) размером в 65535 элементов целочисленного типа и доступом по указателю, со сдвигом на номер порта сервиса. Кодирование необходимо, т. к. в случае простой записи номера порта сервера в вектор могут возникнуть проблемы с нормированием и точностью (для самых «известных» и широко используемых сервисов в диапазоне 1–1500 значения после нормирования будут значительно меньше, чем для малоизвестных сервисов в конце диапазона портов). Для IP- и ICMP-пакетов в поле сервиса записывается 0.

Пусть на вход алгоритма поступает некий пакет. В случае IP- или ICMP-пакета преобразование его в вектор признаков осуществляется за один шаг без каких-либо дополнительных действий. При поступлении UDP-пакета единственное отличие заключается в определении, какой из двух портов (отправителя или получателя пакета) является сервисом, и этот параметр должен быть закодирован и вписан в соответствующее поле. После этого пакет также преобразуется в вектор признаков. Для TCP-пакета возможны четыре следующих случая:

захваченный пакет содержит флаги SYN или SYN+ACK: в памяти системы формируется новая сессия и добавляется в специальную структуру

SD (Session Data); **никаких дополнительных эвристик** для определения сервиса не нужно, т. к. мы находимся непосредственно «в начале» TCP-соединения;

захваченный пакет содержит флаги FIN, FIN+ACK или RST и сессия присутствует в SD: на основе сессии формируется вектор и сессия удаляется из SD;

захваченный пакет не содержит флагов FIN, RST или SYN и сессия присутствует в SD: обновляем количественные характеристики сессии (количество принятых отправленных байт, пакетов с тем или иным флагом, время и пр.);

захваченный пакет не содержит флагов FIN, RST или SYN и сессия отсутствует в SD: необходимо применить эвристику для определения порта сервиса (аналогично UDP-пакету) и добавить сессию в SD.

Механизм выделения клиентских портов в стеке TCP/IP устроен таким образом, что при соединении с сервером клиентский порт выбирается случайным образом из довольно большого интервала (или интервалов). Так как в самом пакете не содержится какой-либо специфичной для транспортного уровня информации, которая могла бы точно указать, какая из сторон является сервером, необходимы дополнительные шаги для такого определения. Для определения, какая из сторон сессии (в случае, если система упустила ее начало) или UDP-дейтаграммы является сервисом, будет использоваться метод, состоящий из двух шагов:

если номер порта превышает некую определенную пользователем константу, описывающую максимальный серверный порт в его сети, то он является клиентским;

в противном случае, можно использовать предопределенный список серверных портов в сети; такой список представляет собой массив размером 65535 элементов, значение «1» элемента массива означает, что этот порт является серверным; естественно, база серверных портов должна поставляться вместе с системой, кроме того, пользователь должен иметь возможность вносить изменения в эту базу.

Алгоритм в процессе работы использует две структуры данных: для хранения информации о количестве активных соединений сервисов в сети и для хранения сессий (Session Data). Первую можно реализовать как простую хэш-таблицу с ключом,

состоящим из комбинации 32-х битного (адрес) и 16-ти битного числа (порт сервиса). Для хранения сессий необходимо использовать перекрестную хэш-таблицу, в которой мы имеем два набора ключей (комбинации «хост_отправителя : порт_отправителя - хост_получателя : порт_получателя» и, наоборот, обе комбинации ссылаются на одну сессию). Это позволяет распараллелить поиск и ускорить обновление информации о сессиях.

Алгоритмическая сложность процедуры преобразования пакета является очень важной характеристикой, т. к. на этапе тестирования именно она будет в основном влиять на скорость обработки пакетов системой. Очевидно, что процедура определения порта сервиса имеет сложность $O(1)$, и тогда преобразование UDP-/IP- или ICMP-пакета выполняется за один шаг. Рассмотрим случай TCP-пакета. Временем на работу с таблицей активных соединений сервисов можно пренебречь, т. к. она осуществляется только при появлении нового сервиса в сети (в первые минуты работы системы таблица будет заполнена и количество записей в ней мало изменится в дальнейшем). Операция получения элемента из хэш-таблицы сессий имеет сложность $O(\log_2 n)$ и в худшем случае она выполняется два раза (для получения сессии и обновления таблицы списка сессий сервера). Процедура вставки в хэш-таблицу имеет сложность $O(\log_2^2 n)$ и в худшем случае также выполняется два раза. Здесь n – количество сессий, которые в данный момент существуют (еще не завершены) в сети. Таким образом, *в худшем случае*, если полученный пакет модифицирует SD, т. е. начинает новую сессию или заканчивает уже существующую, сложность выполнения процедуры для одного пакета составит $2O(\log_2^2 n) + 2O(\log_2 n) \sim O(\log_2^2 n)$, где n – число активных сессий на момент получения пакета. В среднем, число активных сессий может колебаться для нагруженной сети в пределах от 5000 до 10000 в с. То есть сложность алгоритма является приемлемой для поставленных условий.

Постобработка векторов. Для того, чтобы использовать полученный набор векторов $\{x_n\}$ в эвристическом алгоритме обнаружения вторжений, необходимо провести их постобработку. Она включает в себя нормирование, центрирование и сокращение размерности данных. Первые две процедуры применяются для повышения устойчивости работы системы во время обучения.

Нормирование позволяет улучшить сходимость алгоритмов обучения. Для нормирования и центрирования векторов $\{x_n\}$ применим следующие операции:

$$x_i^N = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}};$$

$$x_i^{NC} = x_i^N - \overline{x_i^N}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

где x_i^N – нормированный вектор; x_i^{NC} – нормированный и центрированный вектор.

Сокращение размерности данных позволяет уменьшить размерность обучающей выборки и, таким образом ускорить этапы обучения и тестирования. Метод главных компонент (МГК) – одно из основных средств уменьшения размерности данных с потерей наименьшего количества информации. Вычисление главных компонент сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных [1].

Пусть имеется матрица переменных $X [n \times m]$, где n – число образцов (строк); m – число независимых переменных (столбцов). В МГК используются новые формальные переменные $t_i, i = 1, 2, \dots, m'$, являющиеся линейной комбинацией исходных переменных $\{x_j\}$:

$$t_i = p_{i1}x_1 + p_{i2}x_2 + \dots + p_{im}x_m.$$

Новые переменные t_i называются «главными компонентами», поэтому и сам метод называется «методом главных компонент». Число m' называется «числом главных компонент». Эта величина заведомо меньше числа переменных m и числа образцов n .

После того как построено пространство из главных компонент, новые образцы X_{new} могут быть на него спроецированы, иными словами, определены матрицы их счетов T_{new} . В методе МГК это делается так:

$$T_{new} = T_{new} P.$$

Процедуру сокращения размерности данных можно ускорить, распараллелив ее, например, при помощи графического процессора GPU. Современные графические процессоры эффективно обрабатывают и изображают компьютерную графику. Благодаря специализированной конвейерной архитектуре они намного эффективнее в обработке графической информации, чем типичный

центральный процессор. Например, преобразование (1) в терминах GPU и библиотеки Microsoft Accelerator будет выглядеть так:

```
FloatParallelArray Xnew;
Xnew = FloatParallelArray.InnerProduct(X,
FloatParallelArray.Transpose(P)).
```

Эвристический алгоритм. Для обнаружения аномалий в наборе векторов будем использовать классификацию с обучением на данных только одного класса при помощи искусственной нейронной сети. Классификация – процесс группировки объектов исследования или наблюдения в соответствии с их общими признаками. Обычно объекты разделяются по нескольким группам. Нас интересует только одна группа – положительные объекты. Все объекты, не попавшие в эту группу, считаются отрицательными или аномальными. Обладая неким набором векторов, полученных из положительного трафика (который был накоплен за определенный промежуток времени), мы должны обучить алгоритм, который определяет, является ли новый пакет похожим на «обычный» для сети трафик или нет. Для того, чтобы обеспечить устойчивость к шуму в обучающей выборке и высокую скорость на этапе тестирования, в алгоритме использован многослойный перцептрон (МП), обучение и работа которого описана в [2].

Детектор. Принцип работы детектора в данном случае очень прост – выбрав некую метрику расстояния P , мы пропускаем всю обучающую выборку через алгоритм классификации и получаем пороговое значение:

$$thres = (1 + \theta) \max P(x_i, y_i),$$

где θ – пороговый коэффициент. Далее, чтобы узнать, является ли произвольный вектор x положительным, достаточно получить посредством ИНС вектор y и проверить, не превышает ли значение $P(x, y)$ порог $thres$.

Прототип и его исследование. Прототип реализован на языке C#. В качестве сенсора выступает утилита `tcpdump` и/или библиотека `sharpPcap`. Алгоритм преобразования реализован с использованием структур данных из библиотеки `.Net System.Collections`. Метод главных компонент и сжатие пространства обучающей выборки реализованы на основе библиотек `alglib` и `Microsoft Research Accelerator` (для быстрых матричных операций с помощью GPU). Библиотека `Neuron-DotNet` используется для операций с ИНС.

Помимо PPs, важными критериями оценки HNIDS являются: CR – количество корректно распознанных аномальных и нормальных пакетов; FP (False Positive) – количество нормальных пакетов/сессий, принятых за аномальные; FN (False Negative) – количество аномальных пакетов/сессий, принятых за нормальные.

Исследование проводилось в два этапа: на данных DARPA Intrusion Detection Evaluation¹ и в реальной сети. Обучение и тестирование проводилось на ПК с процессором Intel Core2Duo P8700 2.53GHz, 1066 Mhz FSP, 4Gb RAM, жесткие диски SATA, Ethernet 1Gbit/s.

На первом этапе испытания проводились на данных DARPA IDS Evaluation. Обучающая выборка состояла из двух наборов трафика – понедельник первой и третьей недели (3 569 991 пакетов); тестовая – из трафика захваченного в понедельник второй недели (1 753 377 пакетов). Тестирование проводилось в режиме «offline», т. е. прототип работал с дампами трафика, полученного утилитой tcpdump. Скорость обработки пакетов на этапе тестирования при этом составила 301,5 килопакетов/с. В тестовой выборке было 17 вторжений сетевого уровня (например, таких, как различные сетевые сканирования nmap, атаки land и smurf и др.). С помощью варьирования таких параметров, как h (количество нейронов скрытого слоя), m' (новая размерность при свертке пространства при помощи МГК) и η (коэффициент обучения) проводились минимизации по критериям FP и FN. При минимизации

по критерию FP, прототип обнаружил 12 атак при двух ложных срабатываниях. При минимизации по критерию FN прототип обнаружил 16 атак при 1 878 ложных срабатываниях. Для сравнения, метод Трана Кванг-Анга (OTAD) [3] на тех же данных показал 8 атак при одном ложном срабатывании (минимизация по FP) и 17 атак при 9 176 ложных срабатываниях (минимизация по FN).

На втором этапе сенсор прототипа был установлен в сети, состоящей из одиннадцати серверов, обслуживающих крупный Web-сайт. Обучение продолжалось в течение понедельника, вторника и среды (более 200 млн пакетов), тестирование – оставшуюся часть рабочей недели. Прототип обнаружил 27 попыток вторжения при 347 ложных срабатываниях. Скорость обработки пакетов в некоторые моменты времени достигала 238 килопакетов/с. На обучение прототип затратил менее четырех часов реального времени.

Разработанный прототип показал неплохие результаты в сравнении с аналогичными системами (на данных DARPA IDS Evaluation обнаружено 12 из 17 атак сетевого уровня). Использование GPU позволило увеличить производительность на этапе обучения почти в три раза, а на этапе тестирования – в полтора раза. Испытания в сети показали возможность применения прототипа в реальных условиях. Дальнейшее ускорение работы прототипа возможно за счет его реализации на статически компилируемом языке, например, на C++.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. [Текст]/ С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков [и др.]. –М.: Финансы и статистика, 1989.–607 с.
2. **Большев, А.К.** Применение нейронных сетей для обнаружения вторжений в компьютерные сети [Текст]/А.К. **Большев, В.В. Яновский//Вест-**

ник СПбГУ.–2009.–Сер. Прикладная математика информатика процессы управления. –Вып. 4. –С. 38–44.

3. **Quang-Anh, Tran** One-class Support Vector Machine for Anomaly Network Traffic Detection. [Текст]/Tran Quang-Anh, Duan Haixin, Li Xing. –Tsinghua University, Beijing, 2007.

¹ <http://www.ll.mit.edu/mission/communications/ist/CST/index.html>



УДК 004.9:004.55

В.В. Амосов, С.А. Фёдоров

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ АСНИ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР

Необходимость изучения быстропротекающих явлений (физика плазмы, взрывы, вспышки, разрушения, баллистика) и новые оптические датчики требуют создания современной контрольно-измерительной аппаратуры на основе встраиваемых в них автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). Наиболее сложные задачи возникают в исследованиях физики плазмы. Подобные исследования накладывают ряд ограничений общего характера:

- определение границ и особенностей реакции;
- обязательное интегрирование в существующие диагностические комплексы;
- работа в условиях сильных электромагнитных помех;
- необходимость передачи данных большому числу пользователей на удаленные центры наблюдения и обработки данных.

Анализ используемых современных подходов по сопряжению камеры с компьютером и разработке встроенного математического и программного обеспечения показал, что часть из них применяют отдельные платы захвата для установки в компьютер (FastVideo, СЕДАТЭК, Cameralab, IDS), что накладывает ряд ограничений:

малая длина кабеля до компьютера (обычно 3–5 м) приводит к необходимости использования дополнительной вычислительной машины, прежде чем передать данные большому числу пользователей на удаленные безопасные центры наблюдения;

низкая скорость передачи данных для управления камерой (до 57 600 бод) из-за того, что высокоскоростные интерфейсы связи с платой ориентированы на высокоскоростную передачу в одну сторону (например, Camera Link). Существуют также повторители (repeaters), которые могут увеличивать максимальную длину кабеля. Однако для работы на максимально высоких частотах такие длины кабелей совершенно не подходят и

повторители не используются. Для конфигурации Full CameraLink рекомендуется пара кабелей длиной от 1,5 до 3 м, причем эти кабели обязательно должны быть одинаковыми;

соединение камеры с компьютером требует установки дорогостоящих специализированных плат захвата стоимостью около 100 000 руб. и может привести к несовместимости с используемыми диагностическими компьютерными комплексами из-за отсутствия в них интерфейса для платы (ISA, PCI, PCI Express);

соединения всегда имеют вид точка-точка, что затрудняет работу при подключении нескольких камер одновременно для наблюдения с нескольких ракурсов;

из-за наличия платы и установки для нее драйверов появляется зависимость от них и от определенного семейства ОС – Windows.

Подходы производителей, использующие технологию Ethernet (FastVideo, СЕДАТЭК, Видеоскан, БИФО, visionresearch, Photron, Fastec Imaging Corporation, Basler AG, AOS Technologies, Kbinova, Lambert Instruments, IMPEREX, Olympus), обладают следующими недостатками.

- Современные высокоскоростные камеры, имеющие один из сетевых интерфейсов Ethernet, не используют технологий Интернета. Из-за этого большинство камер работает лишь с операционной системой семейства Windows и требует установки дополнительного ПО и даже драйверов для начала работы;

- Нет поддержки многоядерных и многопроцессорных архитектур, используемых в выпускаемых процессорах.

Исследования и разработки показали возможность создания камеры как полноценного сетевого устройства и то, что большинство камер имеют светочувствительные матрицы со схожими характеристиками, поэтому встраиваемое математиче-

ское и программное обеспечение играет важную роль, т. к. определяет функции и конкурентоспособность камеры как изделия.

Существующие на данный момент подходы по разработке математического и программного обеспечения используют технологии настольных приложений. Предлагаемый подход лежит в области научной отрасли информатики, вычислительной техники и управления и состоит в создании принципиально новых сетевых устройств. Новизна подхода состоит в совместном использовании технологий разработки *богатых приложений Интернета* и *параллельном программировании* – многопоточности приложений, которые непосредственно плохо совместимы из-за того, что технологии Интернета для обеспечения переносимости основаны на интерпретации кода, а не его исполнении. В настоящий момент средств неявной многопоточности для интерпретируемого кода практически не разработано, за исключением тестируемых технологий.

Говоря более подробно, такой подход достигается следующими решениями.

- Разработка встраиваемого программного обеспечения как богатого приложения Интернета (Rich Internet Application [1]), а не настольного приложения (как в существующих подходах). Богатые приложения Интернета обладают такой

же переносимостью, как и классические приложения Интернета, и такими же возможностями, как и настольные приложения (поддержка неявной многопоточности, полный доступ к системе с правами пользователя). Среди наиболее популярных технологий разработки богатых приложений Интернета можно отметить Microsoft Silverlight, Sun JavaFX, Adobe AIR, Curl, Qt, Webkitgtk+. Предлагается использовать движок визуализации (layout engine) Webkitgtk+ для отображения страниц Интернета и среду выполнения GTK+ для обеспечения межплатформенности.

- Распараллеливание приложения с помощью технологии неявной многопоточности (OpenMP, Co-array Fortran) для эффективного использования современных многоядерных процессоров.

Это позволяет избавиться от недостатков имеющихся подходов и получить ряд дополнительных качеств. Такой принцип разработки раскрывает свои преимущества по сравнению с существующими обычными сетевыми устройствами.

Применение технологий физического уровня – IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16 (WiMax) дает следующее (табл. 1):

- Повсеместную распространенность в компьютерах – если компьютер может выходить в Интернет, значит, сможет и на камеру. Появляет-

Таблица 1

Новые качества благодаря применению технологий Ethernet, WiFi, WiMax

Характеристика	Подходы с платами захвата	Подходы с технологией Ethernet	Предлагаемый подход	Новые качества
Интерфейс к ПК	CameraLink	IEEE 802.3 (Ethernet)	IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16 (WiMax), любые, поддерживающие TCP/IP	Распространенность – сопряжение с существующими комплексами
Расстояние до ПК	3-5 м	Любое	Любое + воздух	Отсутствие проводов и удаленное обслуживание
Аппаратура в ПК	Плата захвата	Сетевая плата	Сетевая плата или модуль Ethernet, WiFi, WiMax	Отсутствие затрат – сопряжение с существующими комплексами

Таблица 2

Новые качества благодаря применению протокола TCP/IP

Характеристика	Подходы с платами захвата	Подходы с технологией Ethernet	Предлагаемый подход	Новые качества
Интерфейс к ПК	CameraLink	IEEE 802.3 (Ethernet)	IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16 (WiMax), любые, поддерживающие TCP/IP	Распространенность – сопряжение с современными сетевыми технологиями
Начало работы	Установка драйверов и ПО	Установка ПО, иногда драйверов	Автонастройка, любой обозреватель	Простота эксплуатации – одно из требований АСНИ
Число камер к ПК	Сколько плат	Сколько плат	Любое	Исследование с нескольких ракурсов, стереозрение
Доступность	Через ПК	Через ПК	Любая сеть	Возможность коллективного обслуживания
Надежность	ЭМ-помехи	Не во всех протоколах	Подтверждение доставки данных	Гарантированная доставка данных

ся возможность сопряжения с большинством уже используемых компьютерных диагностических комплексов.

- Применение технологий беспроводной связи IEEE 802.11 (WiFi) и IEEE 802.16 (WiMax) позволит при необходимости обходиться без проводов.

- Возможность удаленного обслуживания. Компьютер может находиться в удаленном помещении на любом расстоянии благодаря технологиям Ethernet.

- Отсутствие необходимости устанавливать в компьютер дорогостоящие платы обработки первичных данных (захвата изображения). Это также дает возможность сопряжения с существующими комплексами.

Применение протокола TCP/IP дает следующее (табл. 2):

- Простота эксплуатации – это основное требование к автоматизированным системам научных исследований (АСНИ). Для подключения достаточно вставить разъём Ethernet. Сетевая настройка проводится автоматически (DHCP, DNS).

- Возможность подключения нескольких камер к компьютеру для проведения диагностики с нескольких ракурсов и для задач стереоизображения.

- Возможность коллективного обслуживания. Масштабирование – доступность камеры для целой локальной или глобальной сети благодаря технологиям TCP/IP.

- Использование любых сетевых технологий Интернета, включая беспроводные.

- Гарантированная доставка команд данных – важно для работы камеры в составе сложных диагностических комплексов в условиях электромагнитных помех. За счет подтверждений о доставке уменьшается скорость, но обеспечивается гарантия доставки данных.

Применение современных технологий разработки богатых приложений Интернета (Rich Internet Application) дает следующее (табл. 3):

- Переносимость – сопряжение камеры с любой (!) программной и аппаратной платформой компьютера.

- Отсутствие необходимости устанавливать дополнительное программное обеспечение (ПО)

Таблица 3

Новые качества благодаря применению технологий разработки богатых приложений Интернета

Характеристика	Подходы с платами захвата	Подходы с технологией Ethernet	Предлагаемый подход	Новые качества
ОС на ПК	Windows	Windows	Windows, GNU/Linux, Mac OS	Любая ОС – сопряжение с существующими комплексами
Начало работы	Установка драйверов и ПО	Установка ПО, иногда драйверов	Автонастройка, любой обозреватель	Простота эксплуатации – одно из требований АСНИ
Масштабируемость ПО	Обновление на каждом ПК	Обновление на каждом ПК	Все ПО находится в камере	Легкость и скорость обновлений

для начала работы – нужен только обозреватель, уже имеющийся в каждом компьютере.

- Простота эксплуатации – обозреватель Интернета – программа, знакомая большинству пользователей. Работать с камерой то же самое, что выходить в Интернет.

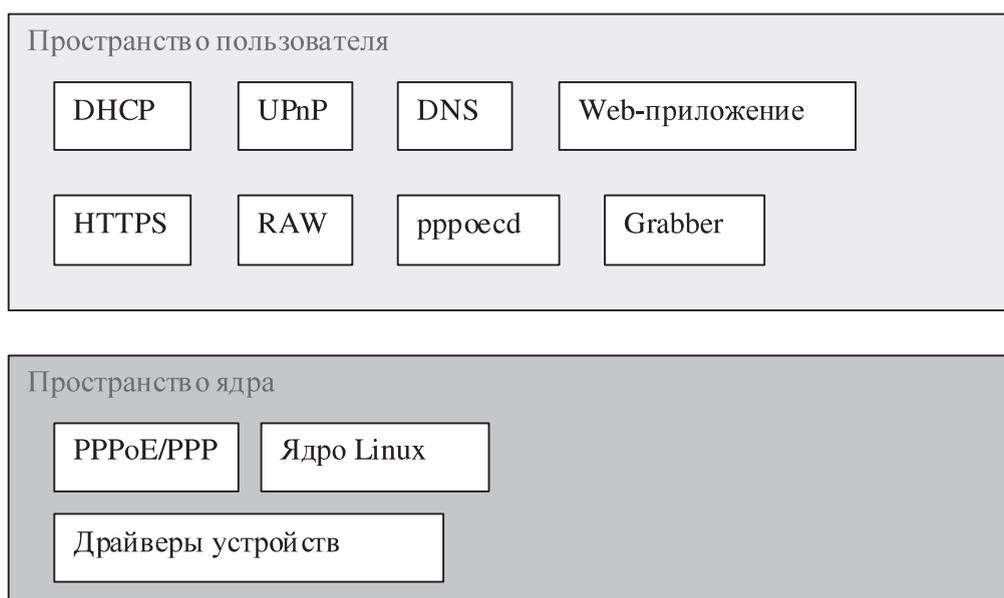
- Легкость и скорость обновлений и масштабирования – все ПО находится в самой камере – не требуется ничего обновлять на компьютерах, которые уже подключались к камере до обновления ПО.

Применение технологии параллельного программирования дает:

- Эффективное использование многоядерных архитектур компьютера, что позволяет повысить быстродействие АСНИ, ведь такие системы предназначены для быстрого получения и анализа данных и быстрого принятия решений;

- Эффективную интеграцию с существующими диагностическими компьютерными комплексами.

Уже разработано встраиваемое программное



Архитектура ПО на уровне пространства пользователя и пространства ядра

обеспечение на основе GNU/Linux [2], обеспечивающее работу камер как сетевых устройств, на котором оценены преимущества использования технологий Fast Ethernet, TCP/IP.

Архитектура встроенного ПО основана на ядре Linux и нескольких процессах (приложениях), выполняющих различные задачи. Каждый процесс запрашивает для своей работы различные ресурсы – кванты процессорного времени, память, сетевое подключение. Ядро Linux обрабатывает их запросы [3]. Таким образом, компоненты встроенного ПО можно поделить на пространство пользователя и пространство ядра в соответствии с блок-схемой на рисунке.

Именно богатое приложение Интернета реализует всю необходимую функциональность, обеспечивает межплатформенность, а также выполняется в многопоточном коде на стороне клиента. За счет него и достигается большинство тех качественных характеристик, о которых говорилось выше.

В драйвере устройства реализуется обработка первичной информации и поддержка передачи данных по сети. Именно за счет того, что драйвер пишется один раз для встроенной операционной системы [4, 5], достигается межплатформенность – не нужно писать драйвер для каждой операционной системы клиента, на клиенте выполняется (интерпретируется) богатое приложение Интернета с функциональностью не меньшей, чем у настольных приложений (в противовес обычным приложениям Интернета).

Стоит отметить другие важные вопросы разработки математического и программного обеспечения встраиваемых АСНИ и высокоскоростных камер:

математическое обеспечение по управлению сенсором;

межплатформенное программное обеспечение по визуализации и обработке данных (для получения независимости от ОС);

исследование и применение технологий параллельного программирования для поддержки многоядерности;

программное обеспечение по системному анализу и обработке информации: определение границ процесса, получение параметров объекта и др.;

программное обеспечение по использованию через кадр двух сенсоров одновременно – стереозрение для увеличения скорости съёмки в два раза. Камеры работают с опозданием на полкадра друг относительно друга, и при дальнейшем объединении видеoinформации на клиенте достигается в два раза большая скорость.

Первое применение данного подхода планируется провести для высокоскоростной сетевой камеры IPC-G1, устанавливаемой на сферический токамак Глобус-М в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН. Дальнейшее применение – разработка подобных высокоскоростных сетевых камер для других учреждений, организаций и предприятий, занимающихся исследованием и изучением быстропротекающих процессов.

Независимость исходного кода от программной и аппаратной платформы позволит использовать разработки для создания новых устройств с более совершенным аппаратным обеспечением, а также для создания сетевых устройств диагностики и наблюдения любого рода (не только камер) на основе автоматизированных систем научных исследований.

В основе предложенного подхода лежат технологии разработки богатых приложений Интернета и параллельное программирование. Подход позволит создавать принципиально новые сетевые устройства – *богатые устройства и приборы*, в основе которых будут встраиваемые *богатые АСНИ*. Такие богатые устройства, приборы и системы не будут требовать установки дополнительного аппаратного и программного обеспечения (для начала работы), не будут зависеть от аппаратной или программной платформы компьютера, являясь межплатформенными, и позволят эффективно использовать многоядерные архитектуры процессоров и многопроцессорные компьютеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allair, Jeremy Macromedia Flash MX—A next-generation rich client [Электронный ресурс].— Macromedia White Paper, 2002.—14 с.

2. Лав, Р. Разработка ядра Linux [Текст]/Р. Лав.—СПб.: Вильямс, 2006.—448 с.

3. **Чезати, М.Д.** Ядро Linux [Текст]/М.Д. Чезати. –СПб.: БХВ-Петербург, 2007.–1104 с.

4. **Salzman, P.J.** The Linux Kernel Module Programming Guide [Текст]/P.J. Salzman, M. Burian,

O. Pomerantz//2007-05-18 ver 2.6.4. 82 с.

5. **Corbet, J.** Linux Device Drivers [Текст]/J. Corbet, A. Rubini, G. Kroah-Hartman.–O'Reilly, 2005.–636 с.

НЕЛЯ АЛЕКСАНДРОВНА ЕСЕПКИНА

(к 80-летию со дня рождения)



1 июня 2010 года исполнилось бы 80 лет Заслуженному деятелю науки и техники РФ, лауреату Государственной премии СССР, доктору физико-математических наук, профессору Неле Александровне Есепкиной.

Неля Александровна Есепкина родилась 1 июня 1930 года в городе Мстиславле Белорусской ССР. В 1948 году окончила среднюю школу с золотой медалью и в этом же году была принята на физико-механический факультет Ленинградского политехнического института.

Свою жизнь и учебу в институте она начала решительно и уверенно, охотно делилась полученными знаниями со своими однокурсниками, делая это легко и доброжелательно. Была Сталинским стипендиатом. Активная и целеустремленная, она сразу стала одним из признанных лидеров на курсе, а затем и в институте, многократно избиралась в бюро ВЛКСМ курса и факультета. Ее личные качества, широкая эрудиция и активная общественная деятельность определили заслуженный авторитет и признание не только у студентов, но и у преподавателей и руководства института. Она активно участвовала в работе первых студенческих строительных отрядов.

Атмосфера дружбы и взаимопомощи в отношениях между однокурсниками поддерживалась ею и после окончания института: она организовывала регулярные встречи сокурсников двух факультетов – физико-механического и радиотехнического.

Научная и педагогическая деятельность Нели Александровны более полувека была неразрывно связана с Политехническим институтом. В 1954 году после окончания с отличием радиотехнического факультета по специальности «Техническая физика» она была оставлена ассистентом на кафедре радиофизики, где после обучения в аспирантуре и защиты кандидатской диссертации работала старшим научным сотрудником, а затем – доцентом. В 1969 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук и стала профессором кафедры квантовой электроники. С 1981 года Н.А. Есепкина – один из ведущих профессоров кафедры радиофизики и радиофизического факультета. Она разработала и читала курсы лекций «Физическая оптика», «Голография и оптическая обработка информации», «Теоретические основы радиолокации». Многогранность ее педагогического дарования и научных интересов, необычайная целеустремленность, а также организаторские способности позволили ей внести заметный вклад в развитие факультета. В 1970-х годах она организовала на факультете отраслевую научно-исследовательскую лабораторию антенн и систем обработки СВЧ сигналов, а в 1990-х годах – научно-учебный центр оптоэлектронных проблем информатики, которым она бессменно руководила.

Научные интересы Нели Александровны охватывали широкий круг проблем в области антенной техники, радиоастрономии, акустооптики, голографии и оптических методов обработки информации.

Она была одной из самых известных среди учеников основателя отечественной школы экспериментальной радиоастрономии профессора С.Э. Хайкина, привлекшего выпускников ЛПИ к исследованию характеристик нового, только что построенного крупнейшего в мире Большого Пулковского радиотелескопа. Ею были предложены и впервые использованы в практике антенных измерений новые методы юстировки и определения характеристик остронаправленных антенн по измерениям в ближней зоне. Электродинамическая теория антенн переменного профиля, в разработку которой она внесла решающий вклад, послужила основой создания уникальных отечественных радиотелескопов – Большого Пулковского радиотелескопа и 600-метрового радиотелескопа Академии Наук РАТАН-600, в сооружении которого она участвовала в качестве заместителя главного конструктора. Эта теория является базовой для всех пользователей РАТАН-600 до сих пор.

С 1970-х годов она активно занималась исследованием новых перспективных систем обработки широкополосных СВЧ сигналов. Под ее руководством и при непосредственном участии был выполнен цикл работ по созданию элементной базы акустооптики и новых акустооптических устройств различного назначения. В созданной ею лаборатории впервые в нашей стране были созданы акустооптические спектрометры для радиоастрономии, которые в то время позволили значительно расширить возможности спектральных исследований в отечественной радиоастрономии. Она не только сумела объединить усилия специалистов, работавших в таких областях, как антенная техника, акустооптика и многоэлементные ПЗС-фотоприемники, на этапе разработки новых систем для обработки радиосигналов, но и обеспечила внедрение таких комплексов в практику радиоастрономических наблюдений, мониторинга радиоизлучения атмосферы, а также в состав радиоэлектронных систем специального назначения.

Н.А. Есепкина – автор более двухсот пятидесяти научных трудов, среди которых написанная в соавторстве и изданная в издательстве «Наука» монография «Радиотелескопы и радиометры», ставшая настольной книгой для нескольких поколений радиоастрономов, а также десять изобретений. Неля Александровна была одним из самых известных и авторитетных специалистов по таким научным направлениям, как радиофизика, антенная техника, радиоастрономия и оптическая обработка информации. Она была членом диссертационных советов при СПбГПУ, СПбГУТ имени А.М. Бонч-Бруевича, Специальной астрофизической обсерватории РАН, Институте прикладной астрономии РАН. Среди ее учеников – двадцать кандидатов и четыре доктора наук. Она активно работала в Научных советах РАН по проблемам «Радиоастрономия» и «Голография». Ее мнение высоко ценили ученые не только научных организаций России, но и представители научной элиты Украины, Армении, Белоруссии, Кыргызстана, Туркменистана.

За успехи в научной и педагогической деятельности Неля Александровна Есепкина была удостоена почетных званий Заслуженный деятель науки и техники РФ (1994) и лауреат Государственной премии СССР в области науки (1984); была награждена орденом Трудового Красного Знамени (1976), золотой медалью ВДНХ СССР (1979) и другими медалями.

Заложенные Н.А. Есепкиной традиции научной и педагогической деятельности сохраняются и развиваются ее коллегами, учениками и последователями, работающими во многих вузах, академических и отраслевых институтах.

Н.А. ЕСЕПКИНА И ПУЛКОВСКАЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Пулковскую школу радиоастрономии трудно представить без Нели Александровны, хотя она никогда не числилась в штате Главной астрономической обсерватории Академии наук.

Практически с первых проблем освоения Большого Пулковского радиотелескопа (БПР) все обсуждения их проводились с активным участием Нели Александровны. Перечислим некоторые из них, где ее роль была определяющей, и предложенные ею решения отразились на судьбе Пулковской радиоастрономии.



Построенный в нашей стране в середине 1950-х годов БПР был крупнейшим в мире рефлекторным радиотелескопом с горизонтальным размером $D=130$ м. Возникла проблема экспериментального измерения его диаграммы направленности, которая обычно измеряется в дальней зоне на расстояниях $R > D^2/\lambda$. На волне 3 см это сотни километров и надо было искать другие методы измерений. Неля Александровна показала, что введение простой квадратичной фазовой ошибки в распределение поля в апертуре радиотелескопа (скажем, выносом первичного облучателя из фокуса) позволяет приблизить ближнюю зону на порядки. Это было немедленно реализовано, с установкой источника сигнала на небольшой вышке вблизи поселка Александровка к югу от БПР. Позднее эта методика была расширена с использованием управляемости формой поверхности АПП (антенн переменного профиля) и используется до сих пор на радиотелескопе РАТАН-600 (Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Северный Кавказ), в частности, в режиме автоколлимационной проверки его фокусирующих свойств.

Нестандартная геометрия БПР потребовала создания для него теории инструментальных поляризационных эффектов. Фактически, Неля Александровна предложила схему вычисления матрицы Мюллера с I, U, Q, V параметрами Стокса для рефлекторов с любой геометрией. Это стало основой для предсказания всех видов паразитной поляризации, возникающих при наблюдениях на антеннах переменного профиля. Экспериментальная проверка показала правильность этих предсказаний.

Антенны типа АПП из-за больших линейных размеров чувствительны к фазовым возмущениям фронта волны в атмосфере Земли, имеющим близкий к Колмогоровскому спектр пространственных частот, растущий к большим масштабам. Н.А. Есепкина имела отношение к первым оценкам этих эффектов, которыми позднее занимались Д.В. Корольков и А.А. Стоцкий (как и Н.А. – выпускники Ленинградского политехнического института). Оказалось, что понимание Пулковской школой роли атмосферы в ограничениях на предельно большие рефлекторные радиотелескопы было решающим при отстаивании проектов АПП (включая РАТАН-600) на межведомственных экспертных комиссиях, где участвовали основные теоретики в этой области от Военно-промышленного комплекса СССР.

В начале 1980-х годов Неля Александровна, во время своей командировки на РАТАН-600, показала нам знаменитую статью Скотта и Райла по голографическому методу измерения фазовых ошибок в раскрые зеркал в двухэлементном радиоинтерферометре. Сразу после ее отъезда создали группу (Г.А. Пинчук, А.А. Стоцкий) для реализации этой идеи на РАТАН-600 и быстро получили уникальные по точности результаты. Погрешности по радиальной координате в положении отражающих элементов основной поверхности радиотелескопа (к которым наиболее чувствителен КПД радиотелескопа) удавалось получить методом голографии с точностью до 20 мк за минуты времени! Важно, что это открыло новое качество АПП – возможность создания «адаптивной поверхности» с быстрой коррекцией деформаций волнового фронта, возникающих по разным причинам, включая фазовые деформации в атмосфере Земли. Сегодня, с внедрением оперативной автоматизированной системы управления всеми степенями свободы отражающих элементов, эта возможность становится реальной. Исследования на РАТАН-600 показали, что понятие «реального времени» в радиодиапазоне отличается от принятого в оптических телескопах – это доли часа, а не миллисекунды.

Неля Александровна стремилась поднять потенциал РАТАН-600 внедрением новых технологий в приемно-измерительной технике. Прежде всего – это широкополосные акустооптические анализаторы спектра радиосигналов. Некоторые разработки, выполненные в Ленинградском политехническом институте, были реально опробованы при наблюдениях на РАТАН-600.

Многие сотрудники Пулковской школы находились с Н.А. Есепкиной в тесном творческом контакте. Все возникающие при наблюдениях на АПП нестандартные инструментальные проблемы сразу обсуждались с ней, и ответы получались либо немедленно (в тот же час), либо в течение нескольких дней, если требовалась НИР с подключением потенциала сотрудников радиофизического факультета ЛПИ. Приведем несколько примеров. Н.С. Соболева пыталась исследовать на БПР круговую поляризацию в радиоизлучении знаменитой Крабовидной туманности. Она оказалась неправдоподобно большой (около 50 %). Быстро была создана строгая теория (совместно с В.Ю. Петрунькиным), позволившая понять природу не встречавшегося ранее инструментального эффекта. Второй пример – обнаруженная на РАТАН-600 зависимость ширины вертикальной диаграммы направленности от выноса первичного облучателя из фокуса: чем больше вынос, тем шире по вертикали диаграмма. Неля Александровна

сумела оперативно создать оптическую модель для экспериментальных исследований и построить теорию этого эффекта.

В заключение я еще раз хочу повторить, что роль Нели Александровны Есепкиной в становлении Пулковской радиоастрономической школы огромна. Основные электродинамические расчеты по радиотелескопу РАТАН-600, опубликованные в «Известиях Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове» (1972. –№ 188. –40 с.), до сих пор являются фундаментом при любых обсуждениях качества РАТАН-600, а ее часть в монографии «Радиотелескопы и радиометры» (Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Парийский. –«Наука», 1973), связанная с поляризацией рефлекторных антенн, – лучшее в мире пособие по сложной проблеме поляризационных инструментальных эффектов.

Ю.Н. Парийский,
академик РАН, главный научный сотрудник
Специальной астрофизической обсерватории РАН

Н.А. ЕСЕПКИНА В СОВЕТЕ ПО ПРОБЛЕМЕ «ГОЛОГРАФИЯ» АН СССР

В 1970 году при Президиуме АН СССР был создан Научный совет по проблеме «Голография». К тому времени в Советском Союзе уже существовал большой коллектив ученых, занимавшихся голографией и ее применением. Поэтому Научный совет сразу начал активную деятельность. Огромную роль в ней сыграла профессор Неля Александровна Есепкина: сначала, как докладчик на многочисленных конференциях и школах, организованных Советом, а затем (в 1980–1990-х годах) в качестве члена бюро Совета. Она принимала активное участие в составлении программ конференций и школ, руководила работами секций на этих собраниях. Неля Александровна и ее сотрудники выступали с докладами, активно публиковались в тематических сборниках, выпускаемых Советом, принимали участие в дискуссиях и, фактически, являлись ведущей группой исследователей, определяющей развитие акустооптических методов оптической обработки информации, опыт которой перенимали другие ученые, так или иначе связанные с мероприятиями Совета по голографии. Неля Александровна большое внимание уделяла научной молодежи, и работы ее школы постоянно отмечались в отчетах Совета Отделению физики АН СССР, как важные научные достижения. Коммуникабельность и обаятельность Нели Александровны сыграли немалую роль в стимулировании интереса к обсуждаемым проблемам и популярности проводимых мероприятий. В памяти всех, работавших с ней в Научном совете, она осталась прекрасным человеком, замечательным ученым и организатором науки.

С.Б. Гуревич,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН,
в 1970–1999 гг. заместитель председателя Научного совета
по проблеме «Голография» АН СССР



УДК 520.272.5: 621.396.62: 004.72

*С.И. Иванов, А.В. Ипатов, С.К. Круглов,
А.П. Лавров, В.В. Мардышкин, А.Г. Михайлов*

ВЫХОДНОЙ МОДУЛЬ РАДИОМЕТРА С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-32

В 50-60-е гг. в Главной (Пулковской) обсерватории АН СССР под руководством С.Э. Хайкина сформировалась одна из ведущих отечественных радиоастрономических школ. Неля Александровна Есепкина, постоянно работая в Политехническом институте, развивала связи с Академией наук, активнейшим образом участвуя во всех работах по тематике антенн переменного профиля – вначале Большого Пулковского радиотелескопа, а затем и радиотелескопа РАТАН-600 в Специальной астрофизической обсерватории АН. Достижения Пулковской школы радиоастрономии отражены в фундаментальной монографии [1].

Н.А. Есепкину отличало острое чувство нового, умение находить точки соприкосновения и объединять интересы людей из разных организаций, разных областей профессиональных интересов. Эту сторону ее способностей характеризует и одна из разработок в области радиоастрономического приборостроения – создание узлов радиометра, выполненная благодаря организованному Нелей Александровной взаимодействию сотрудников лаборатории РПУ ИПА РАН, факультета технической кибернетики и радиофизического факультета СПбГПУ.

Н.А. Есепкина первой обратила наше внимание на перспективность применения цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) в выходных узлах радиометров и волоконно-оптических линий связи и всячески поддерживала исследования в этих направлениях. Актуальность применения волоконно-оптических линий определяется тем, что на больших полноповоротных радиотелескопах регистрирующая аппаратура обычно размещается вне антенны, что требует наличия длинной линии передачи между приемным и выходным устройствами. Такая линия вносит заметные потери и является причиной появления различных помех и паразитных сигналов в регистрируемых данных.

Нелей Александровной была высказана идея создания цифрового выходного устройства радиометра, размещаемого на антенне в непосред-

ственной близости от приемных устройств, способного передавать информацию по цифровым линиям связи, защищенным от влияния помех. В данной статье приведены результаты разработки такого выходного устройства для радиометра радиотелескопа РТ-32 комплекса «Квazar-КВО».

В состав современных радиотелескопов, как правило, входит комплекс сложного радиоэлектронного оборудования для радиометрии – радиометры, предназначенные для измерения и регистрации энергетических характеристик радиоизлучения исследуемых космических источников [1, 2]. В радиометрах нового поколения для радиотелескопов РТ-32 используются цифровые выходные модули, осуществляющие более сложную и гибкую цифровую последетекторную обработку сигналов [3].

Нами разработан цифровой выходной модуль радиометра (ВМР), имеющий расширенные функции, включающие алгоритмы демодуляции (синхронного детектирования) и накопления (интегрирования) сигнала; фильтрацию помех и переходных процессов в тракте радиометра; коррекцию нелинейности, температурной и временной нестабильности узлов приемника; регистрацию, визуализацию и определение параметров сигнала в режиме реального времени. Важным преимуществом нового цифрового выходного модуля радиометра является возможность его использования в режиме удаленного доступа данных, когда цифровой модуль расположен в надзеркальной кабине радиотелескопа РТ-32, а передача данных и управление режимом работы радиометра осуществляется по цифровому каналу, например, по волоконно-оптической линии связи. Тем самым исключается трудно устранимое влияние аналоговых каналов связи отдельных узлов приемной аппаратуры, пространственно разнесенных на большие расстояния (до 200 м) [4].

Аппаратная часть ВМР. Структурная схема аппаратной части представлена на рис. 1.

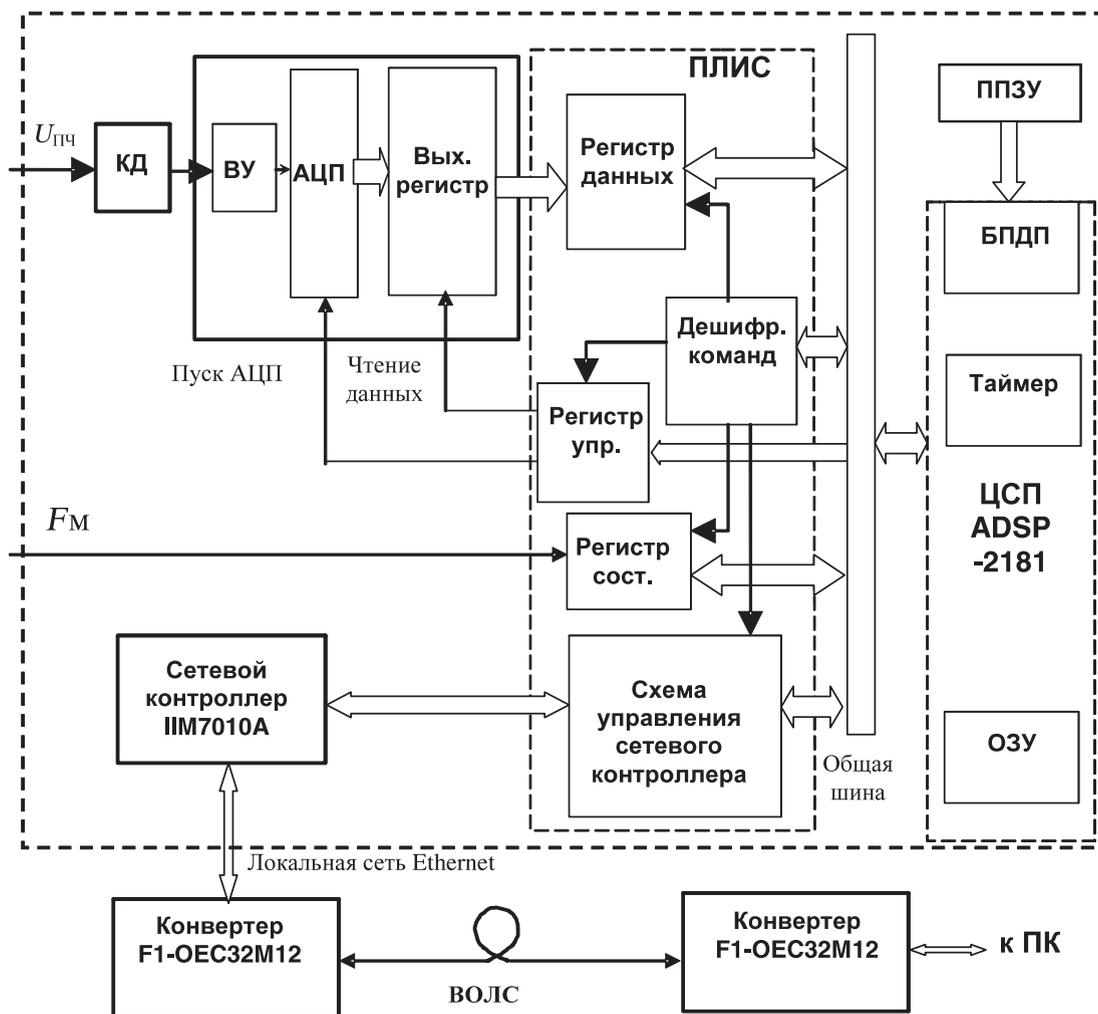


Рис. 1. Структурная схема системы сбора и обработки данных

Для реализации рабочего прототипа ВМР был выбран цифровой сигнальный процессор типа ADSP-2181, который обладает высоким быстродействием (33 Моп/с), большим внутренним ОЗУ (80 Кбайт), встроенным таймером, оптимизированной системой команд для цифровой обработки сигналов и позволяет разрабатывать программное обеспечение как на Ассемблере, так и на языке высокого уровня – Си. Быстродействие ЦСП дает возможность формировать управляющие сигналы и обработку поступающих данных в масштабе реального времени. Для хранения исполняемых программ ВМР было использовано перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ), что обеспечивает старт системы сразу после ее включения. В ППЗУ может храниться как начальный загрузчик программного обеспечения (ПО) из центрального компьютера, так и один из вари-

антов исполняемого ПО ВМР. ППЗУ подключено к ЦСП через быстродействующий байтовый порт прямого доступа к памяти (БПДП).

Схема управления и приема данных с АЦП выполнена нами на базе ПЛИС фирмы ALTERA EPМ7128S, в которую входит регистр управления, дешифратор команд и регистр данных (см. рис. 1). Возможности используемой ПЛИС помогли на ее основе выполнить схему синхронизации работы ВМР и СВЧ приемника (дешифратор команд, регистр состояний) и схему управления сетевым контроллером. Применение ПЛИС в составе ВМР позволяет гибко изменять уровень аппаратно-программного взаимодействия в ВМР, переносить часть операций, выполняемых программно, из ЦСП в ПЛИС и выполнять эти операции уже аппаратно с более высоким быстродействием. Освободившиеся от выполнения



рутинных операций ресурсы ЦСП используются для реализации более сложных алгоритмов обработки сигнала в реальном времени.

Необходимость дистанционного обмена данными с ВМР (на расстояниях более 100 м) потребовала разработки специального канала связи между центральным компьютером радиотелескопа (ЦКР) и ВМР. За основу аппаратной реализации канала связи была выбрана специализированная микросхема W3100A компании WIZnet, в которой аппаратно реализованы как стек сетевых протоколов TCP/IP, так и протокол канального уровня Ethernet. Это помогло разработать и реализовать связь ВМР с центральным компьютером по локальной сети Ethernet 10/100BaseT. Для увеличения расстояния от центрального компьютера радиотелескопа до ВМР в состав системы были включены конверторы F1-ОЕС32М12, обеспечивающие передачу данных по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), что позволило увеличить расстояние между ЦКР и ВМР до 2000 м. На первом этапе разработки также тестировалась передача данных по линии связи с технологией VDSL с использованием конверторов VDSL/Ethernet.

ВМР представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором многие функции управления реализованы программно, что дает возможность оперативно изменять режим работы ВМР без изменения в его аппаратной части. Поэтому программное обеспечение ВМР должно удовлетворять следующим основным условиям: иметь открытую структуру; работать в режиме реального времени; формировать управляющие сигналы в соответствии с временными диаграммами работы ВМР в составе модуляционного радиометра; осуществлять предварительную обработку принимаемых данных (накопление, синхронное детектирование, фильтрацию помех и др.); выполнять дистанционное управление режимами работы ВМР; иметь удобную систему регистрации данных, поддерживающую различные форматы данных как при тестировании работы ВМР, так и в процессе наблюдений; реализовывать временную интерактивную развертку наблюдений и непрерывное отображение в режиме реального времени результатов наблюдений.

Программное обеспечение (ПО). ПО для ВМР написано как сетевое приложение и является двухуровневым: нижний уровень – ПО для

ЦСП выполняет функции сервера; верхний уровень – ПО для персонального компьютера, которое работает как клиент. Структура ПО для ВМР представлена на рис. 2. ВМР может работать как автономно, под управлением собственного компьютера, так и под управлением центрального компьютера с программным обеспечением MarkIV Field System в составе штатного оборудования приемного комплекса радиотелескопа РТ-32.

Программное обеспечение верхнего уровня реализовано в двух вариантах. Первый вариант (Клиент А) предназначен для автономной работы ВМР и решает следующие задачи: реализует временную интерактивную развертку наблюдений; обеспечивает интерфейс с оператором (наблюдателем) за счет использования начального диалога, «горячих» клавиш, отображения информации о принимаемом сигнале и этапах наблюдения; осуществляет загрузку ПО нижнего уровня в цифровой сигнальный процессор по сети Ethernet, отслеживает состояние ВМР и прием информации с него; осуществляет непрерывное отображение в реальном времени принятого и обработанного сигнала; проводит регистрацию данных в файл для последующей обработки. ПО «клиента А» представляет собой многооконное, многопоточное приложение, которое обеспечивает прием данных от ВМР и передачу команд управления на сервер. ПО написано на языке Visual C++.

Второй вариант ПО верхнего уровня (Клиент В) представляет собой программный модуль, интегрированный в общую структуру ПО ЦКР комплекса «Квазар-КВО» [5]. Модуль обеспечивает использование данных ВМР штатными программными средствами ЦКР, предназначенными для проведения радиометрических наблюдений, работ по измерению параметров радиотелескопа и радиоастрономической юстировки антенной системы. Данные ВМР графически отображаются в реальном времени и регистрируются вместе с данными о положении антенны в файле стандартного формата для последующей обработки. ПО ЦКР работает под управлением операционной системы Linux.

Программное обеспечение нижнего уровня выполняет следующие функции: накопление (суммирование) принимаемых данных; синхронную демодуляцию сигнала; синхронизацию рабо-

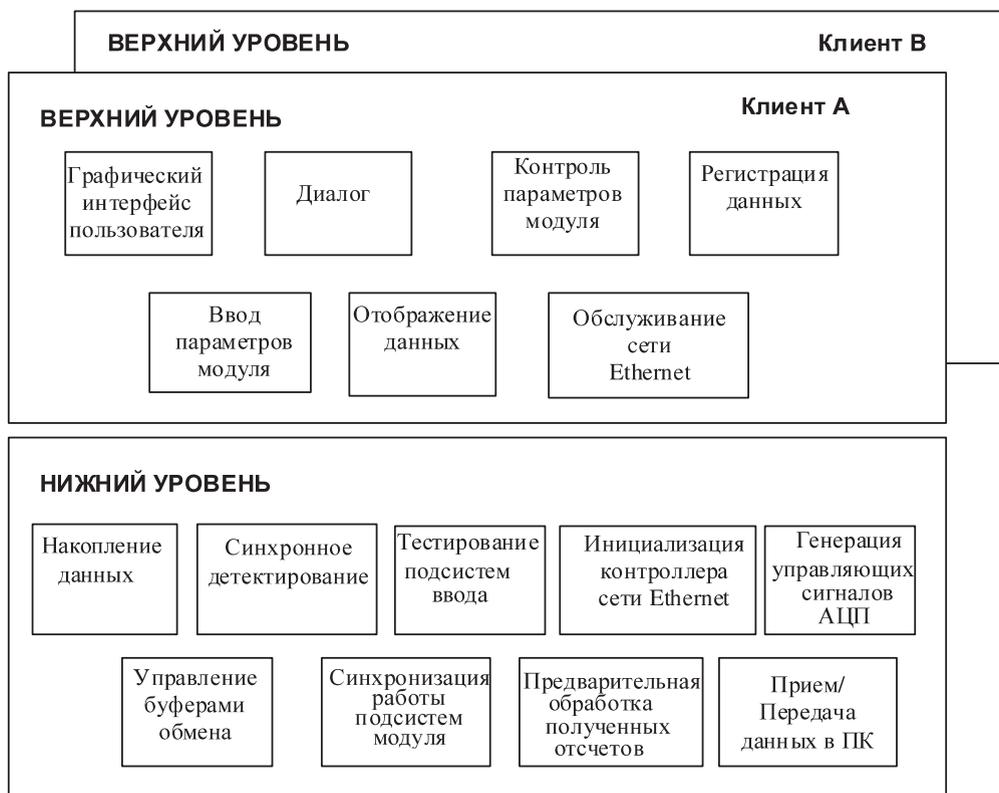


Рис. 2. Структура программного обеспечения ВМР

ты АЦП и ЦСП (генерация сигналов пуска АЦП, считывание оцифрованного результата из выходного регистра АЦП и т. д.); нормировку данных при передаче их в ЦКР; синхронизацию работы ВМР с сигналами внешней модуляции (Fm).

ПО нижнего уровня имеет два модуля. Первый модуль ПО, обеспечивающий формирование управляющих сигналов и первичную обработку данных, написан языке Ассемблера ADSP2181. Второй модуль ПО, обеспечивающий прием и передачу данных с ВМР на персональный компьютер через сетевой контроллер ПМ7010А, написан на языке Си. Оба модуля ПО выполняются параллельно в двухпоточном режиме. Переключение между потоками происходит с использованием внутреннего таймера ЦСП и определяется временем опроса АЦП. Формат передаваемых данных задается режимом работы ВМР и представляет последовательность из 13 байт, которые включают в себя: заголовок, текущее время, данные. Данные поступают с периодом, определяемым постоянной времени накопления ВМР, которая может изменяться в пределах от 0,1 с до 10 мин.

ПО нижнего уровня может быть встроенным (записанным в ППЗУ) или загружаться в процес-

се работы системы [6]. В разработанной системе используются обе эти возможности.

Экспериментальные исследования. Возрастающие требования к точности радиометрических измерений делают необходимой разработку принципиально новых широкополосных СВЧ детекторов мощности с улучшенной тангенциальной чувствительностью и расширенным диапазоном квадратичного детектирования. В разработанном цифровом радиометрическом модуле детектор мощности (квадратичный детектор) выполнен на современном СВЧ транзисторе, одновременно исполняющем роль и нелинейного элемента, и усилителя НЧ колебаний [7]. В детекторе для стабилизации рабочей точки активного элемента использовалась глубокая отрицательная обратная связь, а также источник опорного напряжения в качестве источника питания малошумящего операционного усилителя. Проведена оптимизация характеристик детектора как аналитическими методами, так и схемотехническим моделированием в пакете Microwave Office.

На рис. 3 приведен график отклонения передаточной характеристики разработанного транзисторного СВЧ детектора от линейного закона



Рис. 3. Отклонение от квадратичной передаточной характеристики детектора

детектирования мощности входного модулированного СВЧ сигнала. Видно, что детектор обладает тангенциальной чувствительностью около -65 дБм и диапазоном квадратичного детектирования (по уровню компрессии 1 дБ) более 40 дБ, что существенно превышает аналогичные параметры диодных детекторов СВЧ мощности, например, детектор 8471D фирмы «Agilent Technologies» имеет -50 дБм и 30 дБ, соответственно.

С целью проверки работоспособности ВМР и определения его предельных параметров было проведено тестирование разработанной системы, в т. ч. и в составе штатной аппаратуры приемного комплекса РТ-32 в обсерватории «Светлое» РСДБ комплекса «Квазар-КВО». Тестирование показало, что по основным характеристикам и параметрам (таким, как минимальная и максимальная частота модуляции и дискретизации сигнала, общее время наблюдения, динамический диапазон квадратичного детектирования) разработанный ВМР удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подобным устройствам в составе прием-

ных комплексов современных радиотелескопов в радиометрическом режиме работы.

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты наблюдения источника DR21 на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» с использованием разработанного цифрового выходного модуля радиометра.

Результаты измерений характеристик разработанного макета цифрового ВМР показали перспективность использования выбранной элементной базы (цифровых сигнальных процессоров и ПЛИС) для создания цифровых систем сбора и обработки данных для радиоастрономических приемных комплексов. Предложенная и реализованная структура ВМР позволяет гибко изменять алгоритмы обработки сигналов, проводить первичную обработку данных в масштабе реального времени и обеспечивает дистанционное управление, в т. ч. через глобальную сеть Интернет.

Результаты экспериментальных исследований по дистанционному обмену данными по ВОЛС

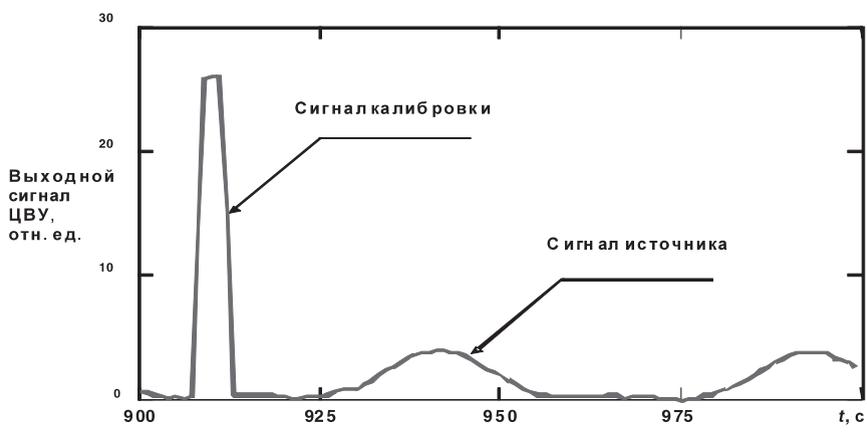


Рис. 4. Регистрация источника на РТ-32 с применением ЦВУ

были использованы при разработке перспективной цифровой системы преобразования сигналов для радиоинтерферометрических наблюдений [8].

Авторы с большим уважением относятся к памяти Н.А. Есепкиной – крупного специалиста

в области радиоастрономии, доброжелательного и богатого на идеи человека. Мы – ее коллеги и ученики – благодарны ей за очень продуктивное совместное сотрудничество, ценим и помним ее вклад в наши результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Есепкина, Н.А.** Радиотелескопы и радиометры [Текст]/Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Парийский. –М.: Наука, 1973.–416 с.

2. **Ипагов, А.В.** Радиометры [Текст]/А.В. Ипагов, Н.Е. Кольцов. –СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007.–92 с.

3. **Ильин, Г.Н.** Четырехканальный цифровой радиометрический модуль ЦРМ-1: отчет [Текст]/Г.Н. Ильин, А.Г. Михайлов, А.С. Лавров. –СПб.: ИПА РАН, 2007.–14 с.

4. **Иванов, С.И.** Цифровая система сбора и обработки данных с дистанционным управлением для радиометрического режима работы радиотелескопа [Текст]/С.И. Иванов, С.К. Круглов, А.В. Митрофанов//Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Субъект. науч. тр.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.–С. 54–59.

5. **Михайлов, А.Г.** Программное обеспечение цен-

трального управляющего компьютера наблюдательно-го пункта РСДБ-сети КВАЗАР [Текст]/А.Г. Михайлов//Тр. ИПА РАН.–2005.–Вып. 12.–С.68–92.

6. **Esepkina, N.A.** Data acquisition systems based on DSP for multichannel radioastronomical receivers [Текст]/N.A. Esepkina, S.K. Kruglov, S.A. Molodyakov V.D. Khaikin//Astronomy & Astrophysics Transactions. –2000.–Vol. 19. № 3–4.–P. 616–623.

7. **Иванов, С.И.** Разработка и исследование транзисторного СВЧ детектора мощности для модуляционного радиометра [Текст]/С.И. Иванов, А.П. Лавров, Ю.А. Матвеев//Матер. науч.-практ. конф.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.–С. 234–235.

8. **Fedotov, L.** The Digital Data Acquisition System for the Russian VLBI Network of New Generation. [Текст]/L. Fedotov, E. Nosov, S. Grenkov//6th IVS General Meeting.–2010.–Hobart, Australia.

УДК: 53.087 533.9.07

Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова

ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ В ТЕХНИКЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Прошло всего 40 лет с тех пор, как У. Бойл и Дж. Смит в 1969 г. изобрели устройство преобразования оптических изображений в электрический сигнал, получившее название ПЗС (прибор с зарядовой связью), до вручения им и Ч. Као в 2009 г. Нобелевской премии по физике «За выдающийся вклад в технологию волоконной оптики и преобразования изображения в цифру». Масштабность изобретения состоит в том, что, казалось бы, простое техническое достижение переросло в уникальное явление, преобразившее все сферы человеческой деятельности. Являясь чисто прикладным изобретением, оптико-волоконные и ПЗС-технологии оказали столь мощное влияние

на познавательные, коммуникационные и производительные возможности человека, что позволили поставить их в один ряд с выдающимися фундаментальными открытиями, расширяющими и обогащающими физическую картину мира, удостоенными высочайшего мирового признания.

В стремительном завоевании мира ПЗС-фотоприемниками (ФПЗС) Россия (тогда еще Советский Союз) не оказалась в стороне, и к концу 70-х гг. в нашей стране уже выпускались собственные линейные и матричные ПЗС-сенсоры в НПО «Пульсар» (Москва) и в НПО «Электрон» (Ленинград).



Отечественные разработки ориентировались, главным образом, на проектирование аппаратуры военного и космического назначения. В то же время были начаты работы по использованию ПЗС-фотоприемников в различных областях науки и техники. Одним из инициаторов применения ФПЗС в научных исследованиях была Неля Александровна Есепкина, которая сразу оценила их широкие функциональные возможности и начала совместные работы с разработчиками отечественных ФПЗС из НПО «Электрон» Б.А. Котовым, В.А. Арутюновым, В.О. Тимофеевым и др. Замечательными качествами Нели Александровны являлись широта ее научных интересов, исключительное чувство нового и смелость в использовании новаторских подходов к решению сложных научно-технических задач. Особо следует отметить, что все ее идеи отличала практическая направленность. Работая на грани смежных направлений, она всегда находила наиболее эффективные пути решения поставленных задач. Неля Александровна щедро делилась своими идеями с коллегами, у нее всегда были тесные контакты с сотрудниками из других институтов, в т. ч. из ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН. С ее «легкой руки» в лаборатории оптоэлектроники и голографии ФТИ были начаты работы по исследованию ПЗС-фотоприемников с целью их применения в физических исследованиях, активно поддержанные профессором С.Б. Гуревичем – руководителем лаборатории и ведущим специалистом в области телевидения и информатики. Работы велись в следующих направлениях:

исследования возможности обработки изображений, имеющих большую информационную емкость, непосредственно на самом фотоприемнике [1, 2];

исследования характеристик и специальных режимов работы ПЗС-фотоприемников применительно к задачам обработки оптической информации, включая интегрально-дифференциальные преобразования оптических сигналов в их выходных узлах [3–5];

синтез требуемой передаточной характеристики оптической системы обработки изображений, основанной на использовании нескольких ПЗС-фотоприемников [6];

реализация специальных режимов работы линейных и матричных ПЗС-фотоприемников для регистрации импульсных сигналов [7–10].

Практическое внедрение ПЗС-фотоприем-

ников в технику физического эксперимента позволило существенно повысить эффективность проводимых исследований.

В данной статье мы остановимся только на одной из областей применения ПЗС-фотоприемников в физических исследованиях – регистрации быстропротекающих процессов. Создание метрологической базы для исследования быстропротекающих процессов необходимо для развития подавляющего большинства новых технологий, в т. ч. в области управляемого термоядерного синтеза и создания новых материалов для полупроводниковых источников излучения и нелинейной оптики. При этом объектом исследований являются пространственно-временные и спектральные характеристики быстропротекающих процессов. В этих применениях в полной мере были реализованы такие свойства ФПЗС как линейность свет-сигнальной характеристики, жесткость геометрического раstra, нечувствительность к электромагнитным помехам, простота синхронизации и гибкость управления режимами накопления и считывания оптической информации, а также простота ее ввода в компьютер для последующей обработки.

Исследования характеристик твердотельных и полупроводниковых лазеров, работающих в однократном или квазипериодическом режиме

Начало 1980-х гг. отмечено активизацией работ в области твердотельных и полупроводниковых (п/п) лазеров видимого и ближнего ИК-диапазона спектра, с которыми связаны многие лаборатории Физико-технического института. По их просьбе в лаборатории оптоэлектроники и голографии был создан целый ряд экспериментальных установок с использованием линейных и матричных ПЗС-фотоприемников, конструкции и режим работы которых выбирался исходя из требований и условий эксперимента.

Исследование излучения лазеров в ближней и дальней зонах. Весьма эффективным оказалось использование для исследования характеристик сверхкоротких световых импульсов линейных ФПЗС с совмещенными секциями накопления и считывания типа ФПЗС-1Л (фотоприемник, в котором функции накопления и переноса заряда совмещены в едином регистре сдвига). Если длительность исследуемого процесса оказывается

меньше периода тактовых импульсов управления регистром сдвига, то регистрация сигнала может осуществляться в любой момент времени при непрерывном считывании сигнала с ФПЗС (так называемый «асинхронный режим» детектирования). Этот принцип был реализован нами в ряде установок, первой из которых была измерительная установка для исследований в реальном времени пространственно-энергетических характеристик излучения импульсно-периодического YAG:Nd лазера (основное излучение $\lambda = 1,06$ мкм, вторая гармоника $\lambda = 0,53$ мкм, длительность импульса излучения $\tau = 5-20$ нс, плотность энергии излучения $0,2-0,5$ мкДж/см², частота повторения до 25 Гц) [7]. Преимуществом такого режима работы фотоприемника является упрощение процедуры синхронизации элементов измерительной установки, а также усреднение темновых токов элементов ФПЗС и, как следствие, уменьшение дефектов изображения, связанных с их неоднородностью.

Для исследований излучения п/п лазеров в ближней и дальней зонах использовался линейный фотоприемник типа ФПЗС-2Л, который позволял легко управлять чувствительностью в широких пределах за счет возможности изменения размеров чувствительной площадки элемента (режим «малых» – 26 мкм и «больших» – 500 мкм фотодиодов), а также реализовать режим электронного экспонирования и синхронизацию накопления сигнала с импульсами излучения за счет использования электрода антиблуминга [8].

Исследование пространственно-спектральных характеристик полупроводниковых лазеров. Применение в качестве детекторов в установках для регистрации изображения ближнего поля излучения п/п лазеров матричных фотоприемников (МФПЗС) дает возможность использовать вторую координату для получения дополнительной информации о спектральных характеристиках излучения. С этой целью в оптическую схему установки для исследования характеристик излучения фазированных лазерных решеток был введен диспергирующий элемент (дифракционная решетка) [10]. Визуализация спектрального разложения распределения интенсивности излучения на резонаторной грани п/п лазера позволила на новом экспериментальном уровне проводить исследования когерентности, спектральных шумов, межмодового взаимодействия, изучать переходные процессы при различных режимах генерации и т. п.

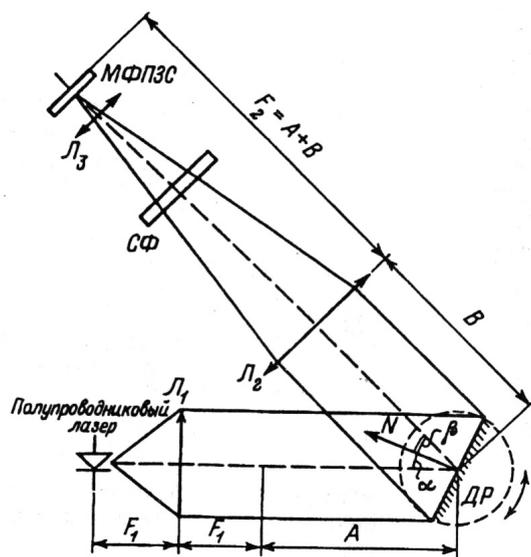


Рис. 1. Оптическая схема установки для регистрации пространственно-спектрального распределения интенсивности излучения п/п лазеров в ближней зоне

Оптическая схема установки представлена на рис. 1. Изображение ближнего поля формировалось вдоль столбцов матричного ФПЗС, а разложение по спектру – вдоль строк. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены экспериментальные картины распределения излучения в ближней зоне и его спектрального разложения для фазированной лазерной решетки на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры с $\lambda = 0,820$ мкм, состоящей из семи элементов с шагом 8 мкм в режиме импульсной генерации с $\tau \leq 1$ мкс и частотой повторения до 10 кГц.

Многоканальный волоконно-оптический спектроанализатор. Опыт создания экспериментальных установок для физических исследований характеристик излучения импульсных п/п лазеров был использован нами для создания многоканальных волоконно-оптических спектроанализаторов для регистрации характеристик и паспортизации спектров лазерных диодов (линеек лазерных диодов).

Разработанный спектроанализатор представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для регистрации характеристик излучателей в области видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра со следующими характеристиками:

спектральный диапазон: 630 ... 680 нм (дополнительный) 780 ... 830 нм (основной) 930 ... 990 нм (основной);

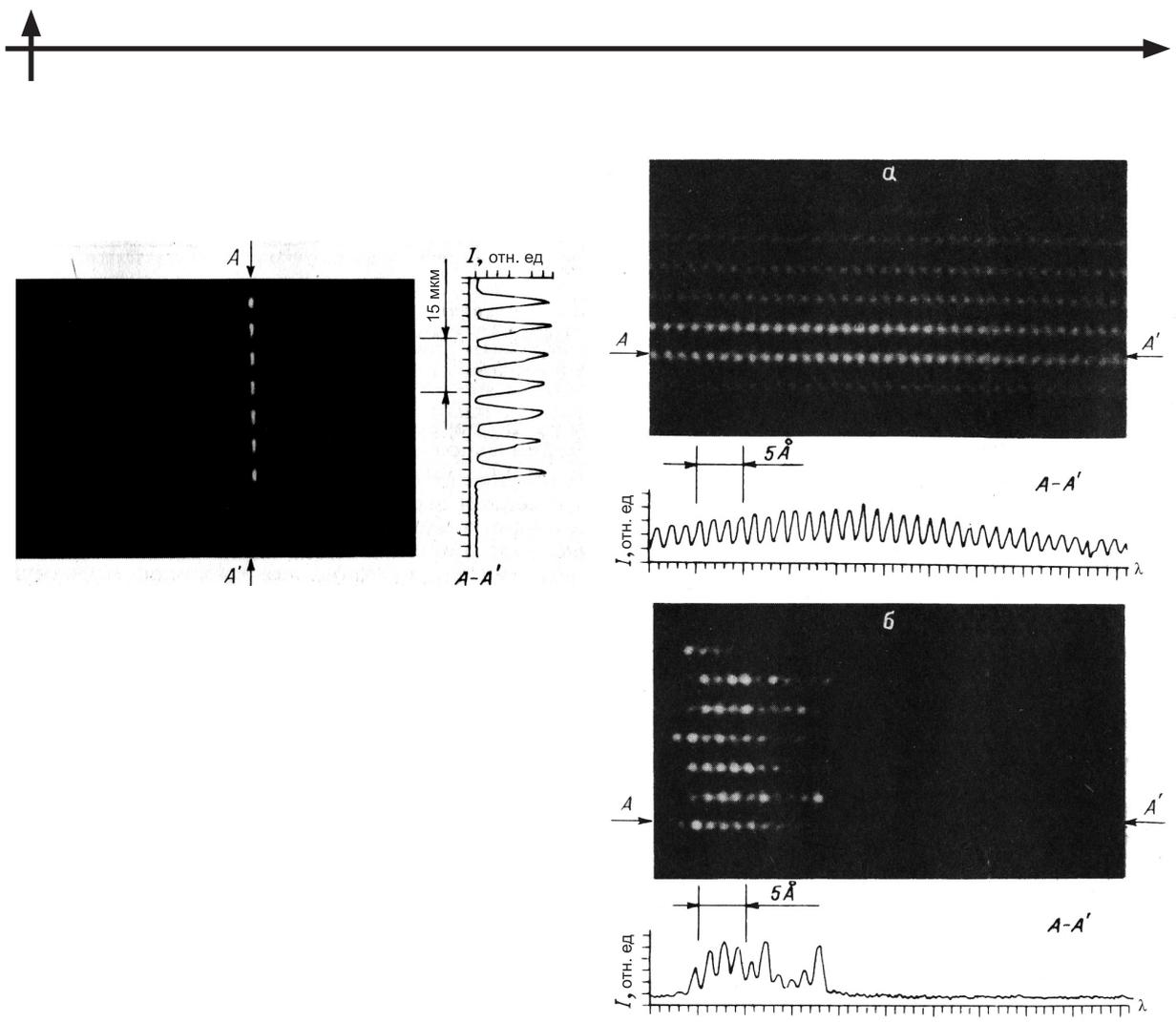


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения фазированной лазерной решетки в ближней зоне (слева) и пространственно-спектральные разложения, полученные в спонтанном ($I = 0,9 I_{\text{порог}}$) режиме (справа, наверху) и в режиме генерации ($I = 1,41 I_{\text{порог}}$) (справа, внизу)

размер тела свечения – 11000×2 мкм² (излучение собирается со всего тела свечения для получения интегрированного спектра различных элементов лазерной линейки);

режим работы излучателей – импульсный или непрерывный;

частота повторения импульсов – от 1 до 1000 Гц;

длительность импульса – от 100 до 500 мкс;

выходная оптическая мощность в импульсном режиме от 25 до 120 Вт.

Ввод излучения в спектральный прибор осуществляется с помощью волоконно-оптического кабеля, что обеспечивает удобство эксплуатации в условиях производства при работе с большим числом образцов, установленных на стенде.

Аппаратная часть комплекса представляет собой спектральный прибор на основе отражательной дифракционной решетки, волоконно-

оптического кабеля с фокусирующей оптической головкой, светосильной оптической системой и линейными ФПЗС типа PLX511 фирмы Sony (число элементов 2048, размер элемента 14 x 200 мкм) с программно-изменяемыми режимами работы в качестве детекторов излучения. Задание автоматизированных режимов работы спектрометра, обработка и документирование результатов измерений поддерживается программой, обеспечивающей настройку режимов работы спектрометра и проведение измерений в режиме реального времени.

В приборе были реализованы следующие технические характеристики:

ширина аппаратной функции – 0,1 нм (4 элемента ФПЗС);

число регистрируемых точек спектра в каждом диапазоне – 2048;

число уровней квантования спектра по интенсивности – 4096;

режимы работы: асинхронный и режим внешней синхронизации;

время накопления сигнала на фотоприемниках – 0,1..1 с;

10/100 Mbps Ethernet интерфейс;

длина оптоволоконного кабеля – произвольная;

питание прибора – от сети 220В, 50 Гц.

Данный измерительный комплекс в течение нескольких лет успешно используется в условиях производства в НПО «Полупроводниковые приборы».

Оптическая диагностика плазмы

Оптические методы диагностики плазмы являются одним из основных средств ее изучения. При этом плазма – один из сложнейших для исследований импульсных объектов, что связано не только с коротким (десятки миллисекунд) временем ее существования, но и с огромными (до 10^6) перепадами интенсивности ее свечения во времени и по пространству. ПЗС-фотоприемники нашли свое применение как для записи оптического изображения плазмы, так и при исследованиях ее оптических спектров.

Система диагностики плазмы методом Томсоновского рассеяния. Одним из эффективных методов диагностики короткоживущей нестационарной плазмы является метод Томсоновского рассеяния, в основе которого лежит явление излучения вторичных волн электронами плазмы, совершающими вынужденные колебания в поле падающей зондирующей электромагнитной волны. При этом частотный спектр рассеянного излучения несет информацию о параметрах плазмы – электронной и ионной температуре, электронной плотности. Применение для регистрации спектра рассеяния комбинации спектрографа и двумерного пространственно-чувствительного детектора позволяет за один импульс зондирующего излучения измерить спектр рассеяния вдоль оси зондирующего пучка, т. е. проследить изменение спектра рассеяния по сечению плазмы. Блок-схема установки приведена на рис. 3.

В эксперименте лазерная плазма образовывалась при фокусировке излучения импульсного неодимового лазера ($E = 3$ Дж, $\tau = 2$ нс, $\lambda = 0,53$ мкм) на поверхности плоской бериллиевой мишени. Образовавшаяся плазма расширяется в вакуум и на определенном расстоянии от мишени пересекается в направлении, перпендикулярном оси разлета, зондирующим пучком из-

лучения рубинового лазера ($E = 0,55$ Дж, $\tau = 20$ нс, $\lambda = 0,6943$ мкм), сфокусированном в каустику диаметром 500 мкм. На входной щели стандартного монохроматора MDR-23 с помощью линзы создается изображение каустики зондирующего пучка. Таким образом, в выходной плоскости монохроматора создается спектрально развернутое изображение области пересечения плазмы зондирующим пучком. Так как угол сбора рассеянного излучения очень мал (определяется шириной щели монохроматора), то для увеличения регистрируемого сигнала используется оптический усилитель на основе микроканальных пластин с коэффициентом усиления порядка 10^6 и ПЗС с входным окном в виде волоконно-оптической шайбы (диаметр волокна 8 мкм), что обеспечивает эффективную стыковку фотоприемника с выходом оптического усилителя без дополнительных потерь света. В качестве фотоприемника использовался матричный фотоприемник с кадровым переносом ФПЗС-13М (256×288 элементов, размер элемента 24×32 мкм). ФПЗС работает в ждущем режиме, в отсутствие импульса излучения осуществляется непрерывная «очистка» фоточувствительных элементов от сигналов темнового тока и фоновой засветки. Длительность накопления полезного сигнала определялась длительностью свечения люминофора оптического усилителя и составляла 10 мс. При размерах фоточувствительной поверхности ФПЗС около 9 мм и линейной дисперсии спектрографа 12 Å/мм разработанная система регистрирует импульсное пространственно-спектральное распределение с шириной спектров до 10 Å.

Система регистрации спектра плазмы на установке «Туман-3М». Разработано устройство регистрации изображения с выхода спектрометра, входящего в состав комплекса оптической диа-

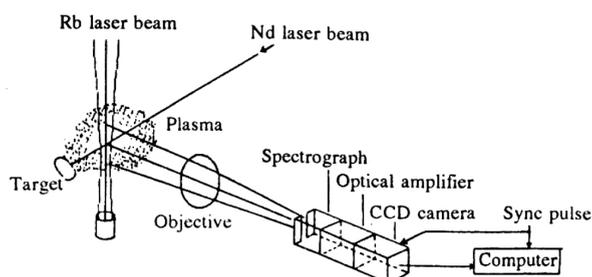


Рис. 3. Блок-схема установки для исследования плазмы методом Томсоновского рассеяния



гностики плазмы на токамаке «Туман-3М». Особенностью задачи являлась необходимость одновременной регистрации спектров, полученных от различных участков плазмы, для исследования скорости ее вращения.

Изображение спектра с выхода спектрометра усиливается электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) до величины, достаточной для нормальной работы фотоприемника, в качестве которого используется матричный ФПЗС со строчно-кадровым переносом LZ2314 фирмы Sharp (число элементов 512×582 , размер чувствительного элемента $9,6 \times 6,3$ мкм²). Изображение двух участков выходного окна ЭОП проецируется на матричный фотоприемник таким образом, что один из спектров занимает верхнюю часть фоточувствительной поверхности ФПЗС, а второй – нижнюю. При считывании информации заряды строк каждой половины раstra (соответствующие различным участкам плазмы) суммируются непосредственно в выходном регистре и выводятся в виде сигналов двух последовательных строк. Таким образом, информация о спектре плазмы при частоте вертикального переноса 1 МГц выводится с частотой 500 спектров/с при эффективных размерах чувствительного элемента порядка $1865 \times 9,6$ мкм² (отношение высоты к ширине или «aspect ratio», являющееся одной из важных характеристик спектрометрической аппаратуры, ~200).

Система регистрации оптического излучения плазмы на токамаке «Глобус-М». Установка «Глобус-М» – единственный в России токамак сферического типа, созданный в ФТИ имени А.Ф. Иоффе в 1999 г. Для исследования процессов зарождения и удержания плазмы раз-

работана высокоскоростная (до 5000 кадров/с) программно-управляемая цифровая видеокамера, работающая в широком диапазоне уровней освещенности. Уникальность предлагаемой разработки заключается в использовании специально разработанного для этих целей в НПО «Электрон» (ООО «Заряд-Т», Санкт-Петербург) скоростного ПЗС-фотоприемника «Квалитет» (256×256 элементов, размер элемента 13×13 мкм², 8 сигнальных выходов). Прибор имеет типичную для высокоскоростных фотоприемников «сплит организацию» – распараллеливание выходов. ПЗС-матрица содержит четыре секции с кадровым переносом, сигнал каждой из которых выводится через свой горизонтальный регистр в двух направлениях. Восемь выходных устройств обеспечивают вывод изображения с высокой скоростью (до 4000 кадров/с) при тактовой частоте выходных регистров 40 МГц. Каждая из четырех секций имеет независимые электроды управления, в т. ч. электроды антиблужинга, что обеспечивает возможность регулировки времени накопления сигнала (времени экспозиции) независимо в каждой из секций матрицы при формировании видеосигнала со скоростью более 1000 кадров/с (время кадра менее 1 мс, поэтому необходимое время экспозиции должно быть определено менее чем за 0,01 мс). Такие скорости управления временем экспозиции недостижимы для механических элементов и могут быть получены только в ПЗС-матрицах с электродами антиблужинга.

С созданным макетом видеокамеры впервые были получены фотографии процесса развития плазменного разряда с временным разрешением 2000 кадров/с, представленные на рис. 4. Из рисун-

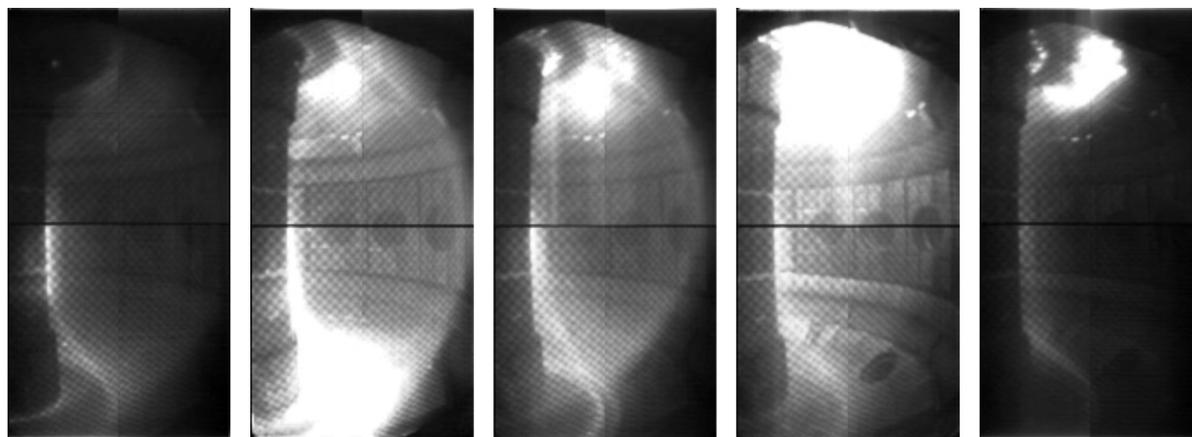


Рис. 4. Изображение плазменного разряда на токамаке «Глобус-М», полученное с временным разрешением 2000 кадров/с

ка видно, что камера обеспечивает регистрацию и передачу изображения в условиях сильных электромагнитных наводок, что являлось одним из важнейших условий разработки системы регистрации.

Быстродействующий пространственно-временной экспонометр в системе регистрации оптического излучения плазмы. В рамках данной работы был предложен метод высокоскоростной регулировки экспозиции, позволяющий за время кадрового синхроимпульса определять яркость выбранного участка регистрируемого изображения и устанавливать длительность накопления в очередном кадре, обеспечивающую согласование величины исследуемого сигнала с динамическим диапазоном видеокамеры. Для реализации данного режима ПЗС-видеокамера дополнена секционированным фотодиодом с независимыми электрическими выходами, оптически согласованным с ПЗС-матрицей. На фотодиод проецируется изображение, которое используется для определения интегральной яркости исследуемого объекта, полностью идентичное изображению исследуемого объекта, формируемого в плоскости ПЗС-матрицы.

Остановимся подробнее на принципе электронного управления экспозицией – эффективном инструменте для расширения динамического диапазона систем регистрации изображений на основе ПЗС-фотоприемников. Принцип электронной экспозиции, реализуемый в большинстве видеокамер на основе ПЗС-матриц использует регулировку их чувствительности за счет изменения времени накопления информационного заряда пропорционального освещенности на фоточувствительных элементах ПЗС-матрицы (времени экспозиции), на основе различных программных и аппаратных средств обработки выходного видеосигнала ПЗС-матрицы. Недостатком стандартных видеокамер является ограничение на быстродействие, связанное с тем, что информация о требуемом изменении времени экспозиции поступает с задержкой, по крайней мере, на время одного кадра. Для снятия этого ограничения мы использовали фотодиод, площадь которого в N раз больше площади одного фоточувствительного элемента ПЗС-матрицы (N – число элементов в матрице). Это обеспечивает в N раз большую его интегральную чувствительность, и, следовательно, для получения регистрируемого уровня сигнала с фотодиода необходимо в N раз меньшее время, чем для фоточувствительного элемента ПЗС-матрицы.

При типичных значениях $N \sim 10^5$ предлагаемое устройство обеспечивает быстродействие, более чем на два порядка превышающее быстродействие существующих аналогов при уровнях освещенности на три порядка превышающих некоторую пороговую величину, соответствующую сигналу насыщения элементов ПЗС-матрицы. Запас по чувствительности фотодиода позволяет разделить его на несколько независимых секций и одновременно измерять уровень освещенности в различных участках исследуемого объекта, используя любой из получаемых сигналов для установки экспозиции, в зависимости от того, какой участок на объекте представляет наибольший интерес. При использовании в видеокамерах высокоскоростных ПЗС-матриц, состоящих из нескольких секций, имеющих общее управление и независимые электроды антиблуминга, каждой из секций ПЗС-матрицы может соответствовать своя секция фотодиода блока автоматической регулировки экспозиции.

Предлагаемый подход, помимо быстродействия, исключает потери информации об исследуемом объекте, связанные с насыщением элементов ПЗС-матрицы, и позволяет использовать недорогие быстродействующие 10-12 разрядные АЦП для регистрации входных сигналов с изменением интенсивности более чем 10^5 раз (эквивалентно 17 разрядному АЦП).

ПЗС-фотоприемники являются убедительным примером стремительного продвижения научной мысли от идеи, возникшей «на кончике пера», до миллионов (а может, и миллиардов!) приборов, без которых уже немислимы современные технологии в научных лабораториях и на производстве. Использование ФПЗС позволило создать современную измерительную базу, открывающую новые возможности на пути исследования фундаментальных физических явлений и повышения эффективности промышленных технологий.

Сотрудники лаборатории оптоэлектроники и голографии ФТИ имени А.Ф. Иоффе с большим уважением относятся к памяти Н.А. Есепкиной – крупного специалиста, открытого и щедрого на идеи человека. Мы ценим и помним, что во многом благодаря активному сотрудничеству с Нелей Александровной Есепкиной сложилось одно из основных направлений наших работ, связанных с разработкой информационно-измерительных систем в технике физического эксперимента.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арутюнов, В.А.** Выходные устройства систем оптической обработки информации [Текст]/В.А. Арутюнов, Н.А. Есепкина, Б.А. Котов, П.П. Лавров, Г.Ю. Сотникова [и др.]/В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений.–Л.: Наука, 1982.–С. 147–165.
2. **Гаврилов, Г.А.** Многоэлементные фотоприемники на основе приборов с переносом заряда для систем оптической обработки информации [Текст]/Г.А. Гаврилов, Б.А. Котов, Г.Ю. Сотникова//В кн.: Проблемы и перспективы оптических методов обработки изображений. – Л.: Изд-во ФТИ АН СССР, 1984.–С. 126–132.
3. **Гаврилов, Г.А.** Оптико-телевизионный процессор на основе ПЗС-фотоприемников. [Текст]/Г.А. Гаврилов, С.Б. Гуревич, Г.Ю. Сотникова//Письма в ЖТФ.–1982.–Т. 8.–Вып. 9.–С. 521–523.
4. **Гаврилов, Г.А.** Дифференцирование оптического сигнала на ПЗСФП. [Текст]/Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова// Письма в ЖТФ.–1985.–Т. 11.–Вып. 16.–С. 968–971.
5. **Гаврилов, Г.А.** Оптикоэлектронные устройства на основе ПЗС для анализа формы поверхности. [Текст]/Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова//В кн.: Современное состояние и перспективы оптических методов передачи, хранения и передачи информации.–Л.: Изд-во ФТИ АН СССР, 1984.–С. 232–238.
6. **Гаврилов, Г.А.** Разрешающая способность преобразователей оптического изображения на основе ПЗС [Текст]/Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова//В сб.: Оптическая обработка изображений. –Л.: Наука, 1985.–С. 90–103.
7. **Бузялис, Р.Р.** Применение линейного ПЗС-фотоприемника для исследования поперечной структуры лазерного пучка [Текст]/Р.Р. Бузялис, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова//Письма в ЖТФ.–1987.–Т. 13.–Вып. 17.–С. 1077–1080.
8. **Гаврилов, Г.А.** Регистрация распределения интенсивности излучения полупроводниковых лазеров в ближней и дальней зонах с помощью ФПЗС [Текст]/Г.А. Гаврилов, Ю.Г. Помигуев, Г.Ю. Сотникова, А.Л. Тер-Мартirosян//Письма в ЖТФ.–1991.–Т. 17.–Вып. 23.–С. 1–5.
9. **Гаврилов, Г.А.** ПЗС-камера в установке для диагностики лазерной плазмы [Текст]/Г.А. Гаврилов, Д.А. Мосесян, Ю.Г. Помигуев, Г.Ю. Сотникова//Письма в ЖТФ.–1993.–Т. 19.–Вып. 5. С. 25–29.
10. **Гаврилов, Г.А.** Установка для регистрации пространственно-спектрального распределения интенсивности излучения полупроводниковых лазеров в ближней зоне [Текст]/Г.А. Гаврилов, Ю.Г. Помигуев, Г.Ю. Сотникова, А.Л. Тер-Мартirosян//ЖТФ.–1996.–Т. 66.–Вып. 4.–С. 196–201.
11. **Gusev, V.K.** Plasma formation and first OH experiments in the Globus-M tokamak [Текст]/V.K. Gusev, T.A. Burtseva, A.V. Dech, G.A. Gavrilo//Nuclear Fusion.–2001.–Vol. 41.–№ 7.–P. 919–925.

535.8.1,004.93'1

*Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков,
Е.Ю. Злоказов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков*

ИНВАРИАНТНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ: ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ В СХЕМАХ КОГЕРЕНТНЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В 70-х гг. в Советском Союзе возникло несколько коллективов ученых, активно занимавшихся голографией, оптической обработкой информации и их применением для решения многих важных задач по обработке сигналов и изображений. Среди таких коллективов была и лаборатория, созданная в Ленинградском политехническом институте профессором Нелей Александровной Есепкиной. Основное направ-

ление исследований – акустооптические и оптоэлектронные процессоры радиосигналов, а также оптическое моделирование характеристик сложных антенн. У Нелей Александровны было острое чувство нового, в частности, она одна из первых обратила внимание на перспективы применения в оптических процессорах появляющихся в то время многоэлементных ПЗС-фотоприемников – линеек и матриц. Она и ее сотрудники выступали

с докладами по результатам своих исследований и разработок на Всесоюзных конференциях и школах по голографии и оптической обработке информации. Работы сотрудников ее лаборатории неизменно вызывали интерес. На этих конференциях и состоялось наше знакомство с ней. С Н.А. Есепкиной лаборатория оптической обработки информации кафедры квантовой электроники (ныне – кафедра лазерной физики) МИФИ на протяжении долгих лет была связана как научными и деловыми, так и самыми теплыми, дружескими отношениями. Без преувеличения можно сказать, что общение с Нелей Александровной – крупным ученым и замечательным человеком – оказало значительное и самое положительное влияние на коллектив лаборатории как в профессиональном, так и в личностном отношении. В плане профессионального сотрудничества, в первую очередь, необходимо упомянуть плодотворное взаимодействие при выполнении ряда исследований по оптической обработке информации, в т. ч. по разработке акустооптических процессоров радиосигналов с использованием полупроводниковых лазеров, при разработке систем РСА, а также систем распознавания изображений на базе многоэлементных ФПЗС [1–3 и мн. др.]. На протяжении ряда лет осуществлялось сотрудничество и в рамках межвузовской программы «Оптические процессоры». В публикуемой статье изложены новые результаты по развитию таких исследований в области оптических систем распознавания изображений, выполненных в лаборатории оптической обработки информации кафедры лазерной физики МИФИ.

Корреляционный метод является одним из наиболее перспективных методов оперативного распознавания изображений. Современные высокоскоростные пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) – жидкокристаллические, микромеханические и др. – делают возможной реализацию систем корреляционного распознавания с эквивалентной скоростью вычислений до 10^{13} операций с фиксированной точкой в секунду. Применение инвариантных корреляционных фильтров (КФ) позволяет добиться устойчивости распознавания к возможным искажениям входного изображения, таким, как поворот, изменение масштаба, изменения освещенности и др., а также к их возможным комбинациям. Один из наиболее перспективных типов инвариантных фильтров

для распознавания контурных бинарных изображений – составной корреляционный фильтр с линейным фазовым коэффициентом (КФ ЛФК). В статье изложены результаты исследований вариантов реализации КФ ЛФК в схемах когерентных корреляторов изображений.

Составные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом

Корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом (LPCC – Linear Phase Coefficient Composite filter, КФ ЛФК) являются одним из перспективных типов корреляционных фильтров и могут применяться для бинарных контурных изображений [4, 5]. КФ ЛФК обладают высокой межклассовой избирательностью. Также КФ ЛФК по сравнению с другими типами КФ «экономны» в плане вычислительных затрат, необходимых для синтеза, поскольку не требуют обращения матриц при расчете. В простейшем случае КФ ЛФК синтезируется в соответствии с формулой:

$$h_{LPCC}^*(x, y) = \sum_{n=0}^{(N-1)} \exp(-j \frac{2\pi}{N} n) s_n(x, y),$$

где $s_n(x, y)$ – изображение эталонного объекта, вошедшее в тренировочный набор изображений при синтезе фильтра.

Для исследования возможностей реализации КФ ЛФК в схемах когерентных корреляторов изображений, в качестве эталонного и ложных были использованы объекты, изображенные на рис. 1. Все тестовые объекты имеют одинаковую толщину контура, элементы контура и суммарную интенсивность. КФ ЛФК синтезирован на основе 18 изображений эталонного объекта, подвергнутых повороту в пределах от 0 до 170 градусов с постоянным шагом 10 градусов. Выбор изображений тренировочного набора был обусловлен кросс-корреляционными свойствами используемых тестовых истинного и ложных объектов, и фактически задает условия задачи распознавания. На рис. 1, а изображено распределение амплитуды синтезированного фильтра. Зависимость интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного объекта, приведенная на рис. 1, б, демонстрирует распознавательные способности синтезированного КФ ЛФК: величина корреляционного пика для изображения эталонного объекта во всем диапазоне поворота выше, чем пороговый уровень, выбранный по максимальному значению пиков для ложных объектов.

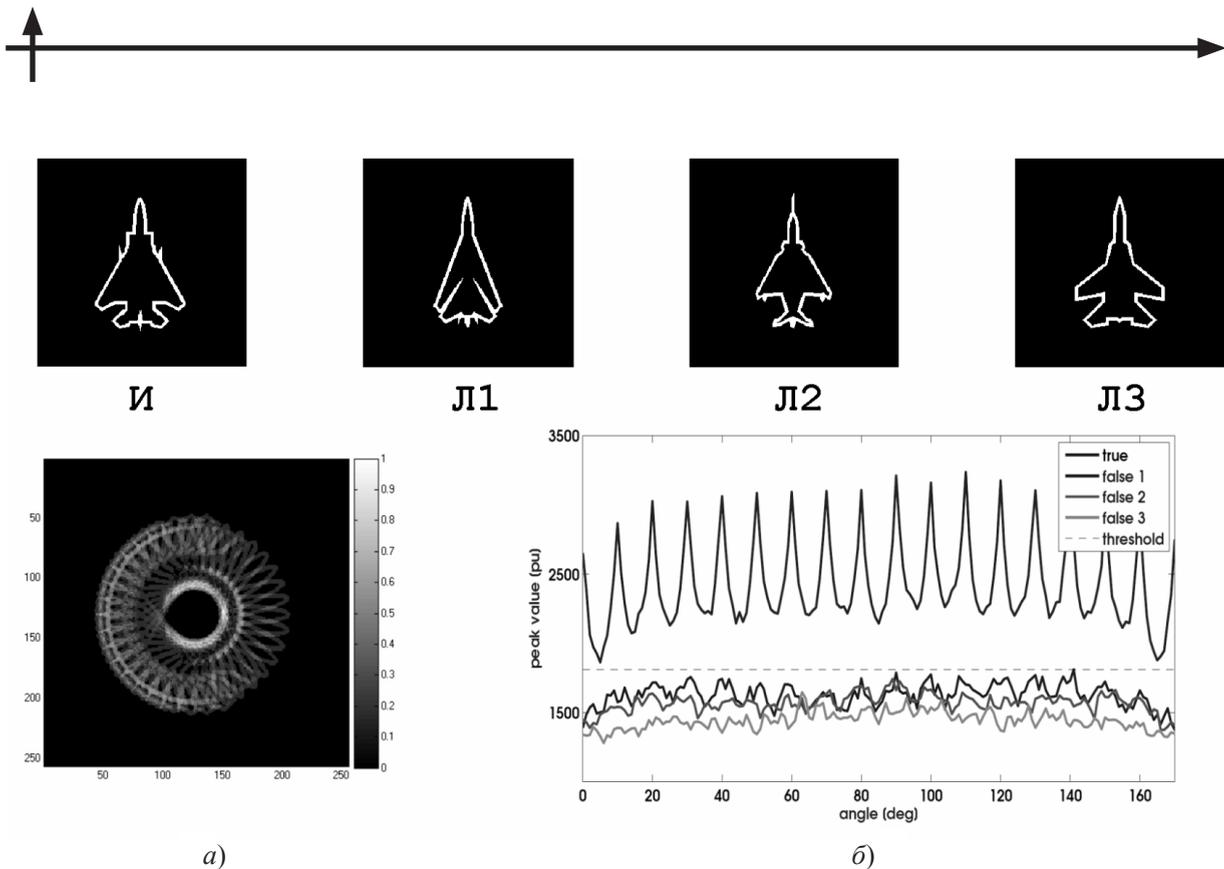


Рис. 1. Эталонный и ложные (1–3) объекты:

- a* – Распределение амплитуды и фазы фильтра, инвариантного к повороту входного объекта в диапазоне $\pm 90^\circ$;
б – Зависимость интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного объекта
(на этом и всех последующих графиках true – зависимость для эталонного изображения;
false 1, 2, 3 – зависимости для ложных (1–3) объектов; threshold – порог)

Варианты реализации КФ ЛФК в схемах когерентных корреляторов изображений

Характеристики современных ПВМС как голографических носителей обеспечивают возможности оперативной реализации КФ ЛФК в когерентных корреляторах изображений. На практике подобные устройства имеют ограниченный динамический диапазон модуляции. Наибольший практический интерес вызывают бинарные носители благодаря их высоким частотам смены кадра. Влияние ограничений динамического диапазона модуляции таких носителей на распознавательные характеристики реализуемого фильтра требует особого исследования. Практика показывает, что в случае применения комплексных инвариантных корреляционных фильтров использование схем с фильтрацией в области пространственных частот обладает рядом преимуществ по сравнению со схемами корреляторов совместного преобразования с фильтрацией в предметной области. В данной статье рассматриваются варианты реализации КФ ЛФК в схемах корреляторов с фильтром в области пространственных частот.

Реализация КФ ЛФК с полной комплексной модуляцией в области пространственных частот. Реализация КФ ЛФК путем комплексной модуляции в плоскости пространственных частот коррелятора вызывает особый интерес в связи с возможностью появления устройств с полной комплексной модуляцией. Среди вариантов подобной реализации стоит выделить следующие: с ограниченным представлением и амплитуды, и фазы; с бинаризацией амплитуды и ограниченным представлением фазы (в т. ч. трехуровневый фазо-амплитудный фильтр, ТУФАФ).

В результате исследования возможности реализации КФ ЛФК в схеме когерентного коррелятора изображений с полной комплексной модуляцией в плоскости пространственных частот установлено, что в случае реализации с ограниченным динамическим диапазоном модуляции и амплитуды, и фазы необходимо сохранить не менее 8 градаций амплитуды и не менее 16 градаций фазы. В случае реализации с бинарной модуляцией амплитуды и ограниченной модуляцией фазы только метод бинаризации Отсу обеспечил инвариантное распознавание во всем диапазоне пово-

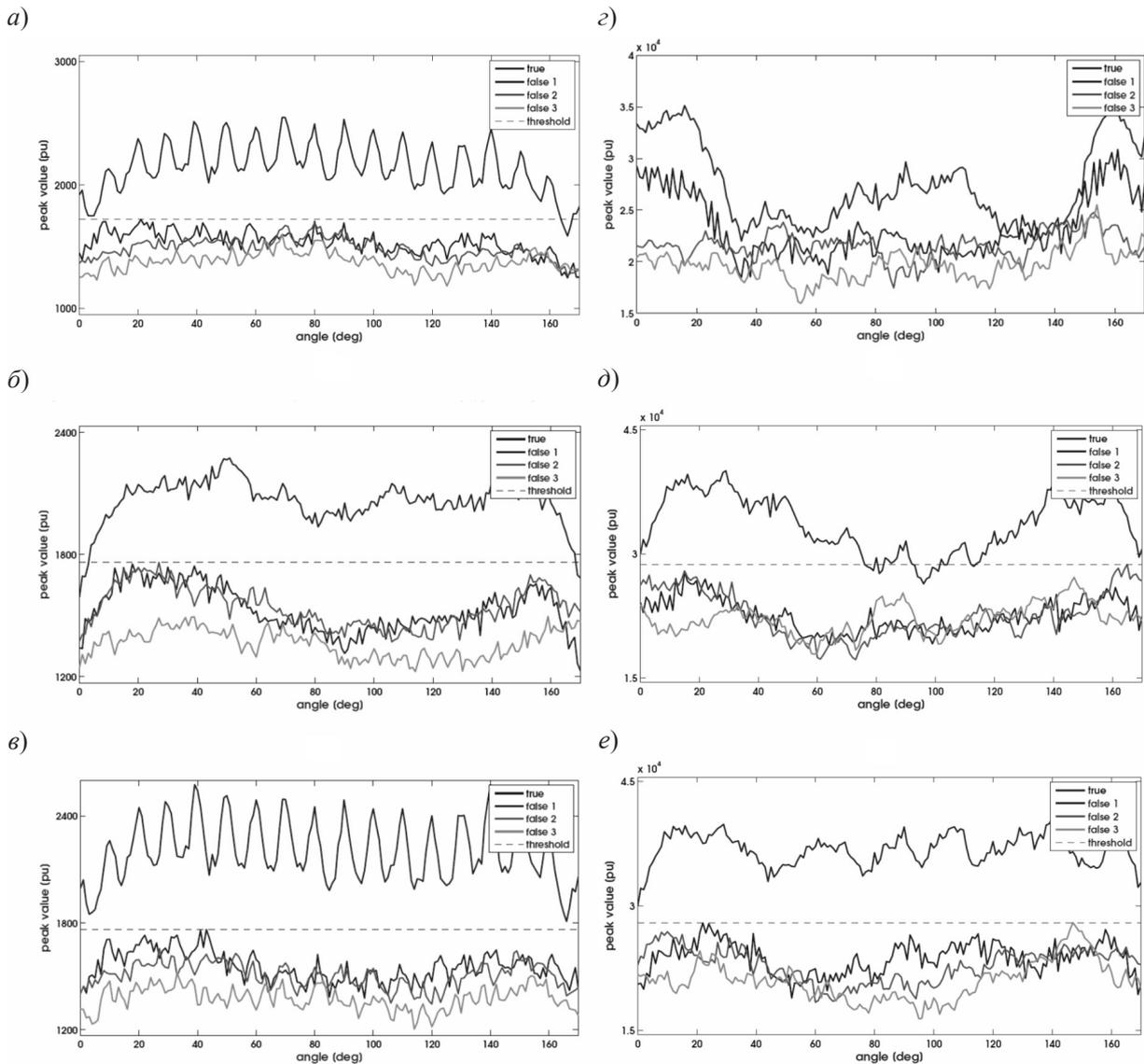


Рис. 2. Зависимость интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного объекта для: *a* – 8 уровней амплитуды, 8 уровней фазы; *b* – 4 уровней амплитуды, 16 уровней фазы; *c* – 8 уровней амплитуды, 16 уровней фазы; *d* – 2 уровней амплитуды (Отсу), 2 уровней фазы; *e* – 2 уровней амплитуды (Отсу), 5 уровней фазы

рота, количество градаций фазы при этом должно быть не менее 5. Рис. 2 иллюстрирует перечисленные результаты.

Реализация КФ ЛФК в корреляторе Вандер Люгта. Это наиболее экономичный метод, по сравнению с вариантами, рассмотренными выше. Схема коррелятора Вандер Люгта – вариант схемы с фильтрацией в плоскости пространственных частот. В данном случае фильтр реализуется в виде синтезированной Фурье-голограммы (голографического фильтра), при этом требуется толь-

ко чисто амплитудная или чисто фазовая модуляция света [6–9].

Специальное программное обеспечение использовано для синтеза голограммы. Голограмма была представлена в виде полутонового изображения с точностью 8 бит (или 256 уровней серого). Моделирование работы коррелятора Вандер Люгта показало, что КФ ЛФК сохраняет свои распознавательные свойства при его реализации в виде голографического фильтра. На рис. 3 приведено изображение центральной части синтезированной



голограммы, рассчитанный отклик голограммы, зарегистрированный отклик голограммы, реализованной экспериментально, а также результаты численного исследования корреляционных свойств для различных вариантов ее реализации, рассмотренных ниже. Импульсный отклик голограммы состоит из δ -функции в нулевом порядке дифракции и двух взаимно сопряженных областей, соответствующих синтезированному фильтру в +1 и -1 порядках. Выходной сигнал коррелятора состоит из изображения входного объекта, зоны свёртки

в +1-м порядке и интересующей, с точки зрения корреляционного распознавания, зоны корреляции в -1-м дифракционном порядке.

Для исследования возможности реализации КФ ЛФК в схеме коррелятора Вандер Люгта с использованием современных голографических носителей были рассмотрены несколько вариантов: использование носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции; бинарных носителей с применением стандартных методов прямой бинаризации и использование бинарных

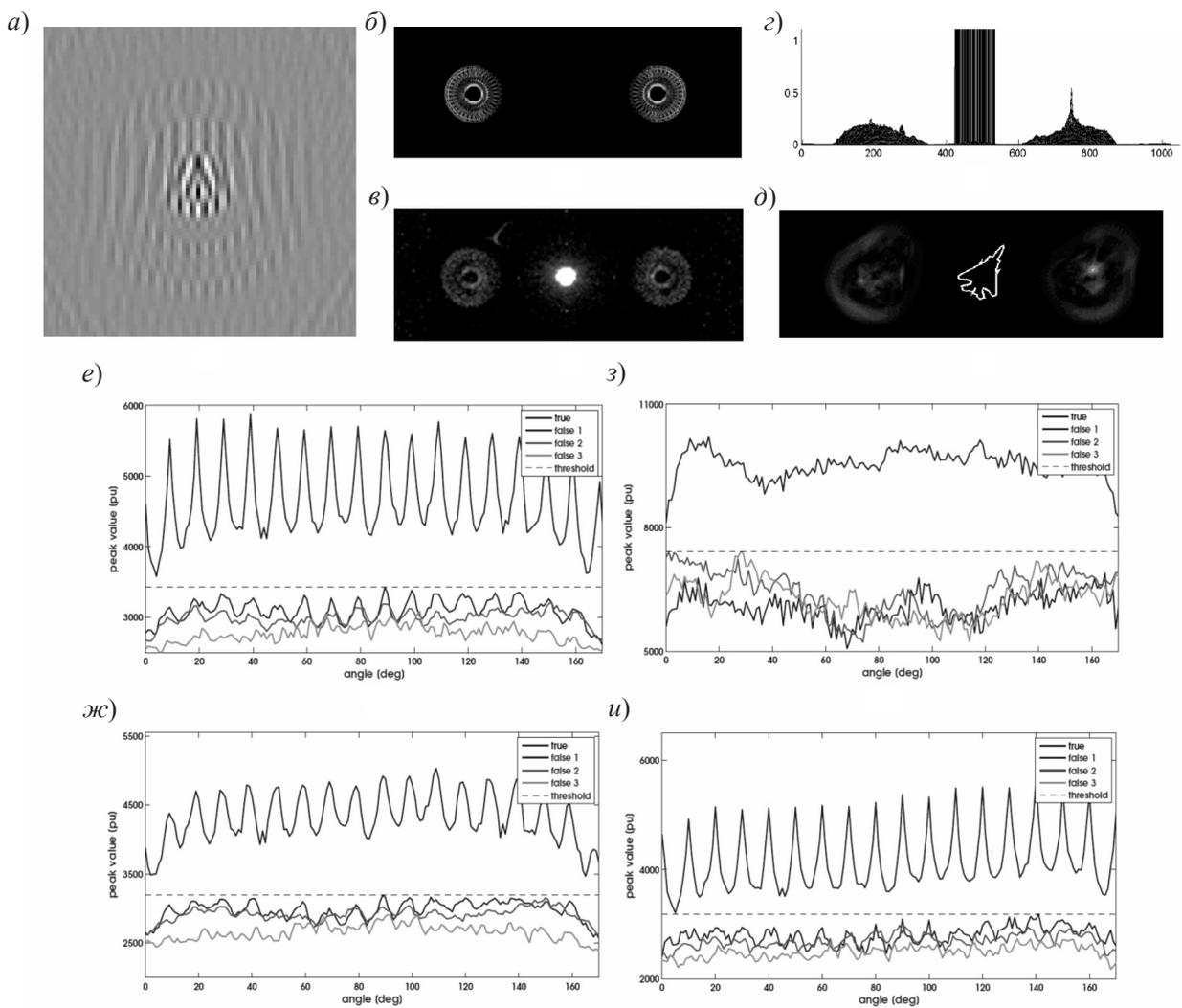


Рис. 3. Синтезированный голографический фильтр и его корреляционные свойства:

a – синтезированная голограмма (центральная часть); *б* – рассчитанный отклик голограммы; *в* – пример отклика голограммы, измеренного экспериментально; *г* – профилограмма рассчитанного выходного сигнала коррелятора; *д* – распределение интенсивности рассчитанного выходного сигнала коррелятора; *e* – зависимость интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного объекта при полном представлении градаций пропускания; *ж* – при представлении 16 градаций пропускания; *з* – в случае бинаризации методом Отсу; *и* – в случае бинарного растривания с представлением 17 градаций пропускания

носителей с применением бинарного растривания для передачи градаций пропускания. Для каждого случая проводились как численный анализ СКО откликов голографических фильтров, так и расчет выходных сигналов коррелятора.

В случае реализации голографического фильтра с помощью носителей с ограниченным динамическим диапазоном модуляции было установлено, что для полного сохранения результатов распознавания достаточно сохранить 32 градации пропускания. Корреляционный пик в случаях входных изображений объектов эталонного класса сохраняет удовлетворительные качества даже в случае передачи четырех уровней пропускания. Анализ результатов численного моделирования показал, что при ограничении числа градаций пропускания до величины, меньшей 16, адекватное распознавание не гарантируется.

В случае реализации голографического фильтра с использованием бинарных модуляторов света были рассмотрены основные типы бинаризации изображений: локальные (методы Ниблака и гистограмм) и глобальный – метод Отсу. В результате моделирования установлено, что применение методов локальной бинаризации не обеспечивает сохранности распознавательных свойств КФ ЛФК. Реализация голограммы, бинаризованной методом Отсу, позволяет распознать эталонный объект среди всех используемых тестовых

объектов, однако анализ СКО показал, что в рамках других постановок задачи распознавания положительный результат подобной реализации не может быть гарантирован.

Исследована возможность реализации голографического фильтра с помощью бинарных модуляторов с применением бинарного растривания для передачи градаций пропускания голограммы. В результате установлено, что для полного сохранения распознавательных свойств голографического фильтра необходимо сохранить не менее 16 уровней представления пропускания.

Экспериментальная реализация КФ ЛФК в схеме коррелятора Вандер Люгта

Результаты моделирования работы когерентного коррелятора Вандер Люгта показали, что КФ ЛФК может быть реализован с использованием бинарных голографических носителей. При этом в случае прямой бинаризации возможно использование метода Отсу, в случае применения стохастического растривания необходимо сохранить не менее 16 уровней пропускания. Для демонстрации возможности подобной реализации был использован экспериментальный макет коррелятора Вандер Люгта. Полученные экспериментальные результаты качественно соответствуют результатам численного моделирования. На рис. 4 приведены примеры

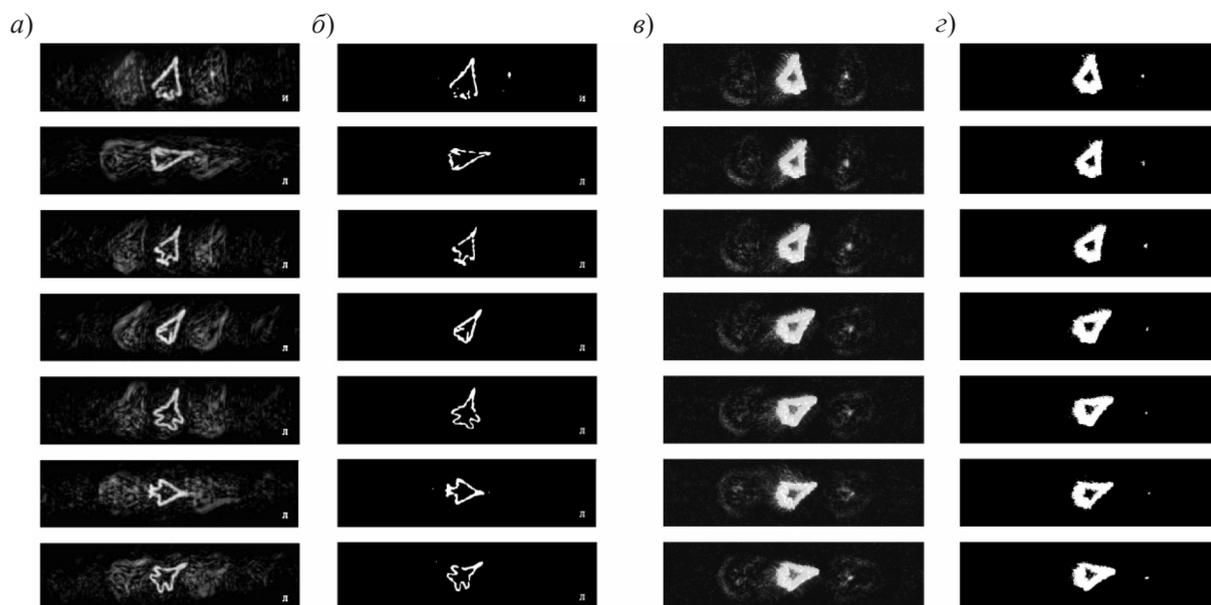


Рис. 4. Выходные сигналы коррелятора и сигналы, подвергнутые операции порога:
а, б – голограмма, бинаризованная методом Отсу; *в, г* – голограмма с 26 градациями пропускания с использованием бинарного растра



измеренных выходных сигналов макета как для случая голографического фильтра, бинаризованного методом Отсу, так и для случая голографического фильтра с представлением градаций пропускания с использованием бинарного растривания.

Результаты, представленные в статье, показывают возможность реализации инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым

коэффициентом в схемах когерентных корреляторов изображений. Для каждого из рассмотренных случаев реализации фильтра определены необходимые и достаточные характеристики используемых при этом средств модуляции лазерного излучения.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ, а также при поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Esepkina, N.A.** [Текст]/ N.A. Esepkina; N.N. Evtikhiev [et al.]//Proc. SPIE. –1992. –Vol. 1704. –P. 115.
2. **Esepkina, N.A.** [Текст]/N.A. Esepkina, N.N. Evtikhiev [et al.]//Proc. SPIE. –1994. –Vol. 2051. P. 236.
3. **Евтихийев, Н.Н.** [Текст]/Н.Н. Евтихийев, Н.А. Есепкина [и др.]//Квантовая электроника. –1995. –Т. 22.–№ 10.–С. 985.
4. **Hassebrook, L.** [Текст]/L. Hassebrook, Kumar B.V.K. Vijaya, L. Hostetler//Opt. Eng. –1990. –Vol. 29.–P. 1033.
5. **Woon, D.** [Текст]/D. Woon, L. Hassebrook, D. Lau//Proc. SPIE.–2006.–Vol. 6234.–P. 62340I.
6. **Евтихийев, Н.Н.** [Текст]/Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков [и др.]//Квантовая электроника. –2008. –Т. 38. –№ 2. –С. 191.
7. **Evtikhiev, N.N.** [Текст]/N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov [et al.]//Proc. SPIE. –2008. –Vol. 6977. –P. 69770C.
8. **Starikov, R.S.** [Текст]/R.S. Starikov, E.Yu. Zlokazov//Proc. SPIE. –2009. –Vol. 7358. –P. 73580W.
9. **Evtikhiev, N.N.** [Текст]/N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov [et al.]//Opt. memory & neural network. –2009.–Vol. 18.–№ 3.–P. 141.

УДК 621.396, 520.35, 534::535

А.П. Лавров, С.А. Молодяков, И.И. Саенко

АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Появление, а затем и широкое распространение лазеров стимулировало в 70–80-х гг. XX в. всплеск интереса к применению методов когерентной оптики для обработки радиосигналов при решении различных радиофизических задач. Тогда же стали активно обсуждаться идеи проведения операций обработки сложных, в т. ч. многомерных радиосигналов над их оптическими моделями применительно к обработке сигналов различных антенн.

Профессор Н.А. Есепкина одна из первых в нашей стране оценила большие возможности методов когерентной оптики и голографии применительно к задачам антенной техники и обработки информации и активно занялась исследованиями в области разработки и применения когерентных

оптических систем для решения задач обработки сигналов в радиоастрономии. Ею была создана группа по оптической обработке информации сначала на кафедре квантовой электроники, а затем на кафедре радиофизики, позднее преобразованная в научно-учебный центр, руководителем которого она оставалась до последних дней. Разработанные в этом коллективе оптоэлектронные системы, объединяющие достоинства акустооптических фурье-процессоров и многоэлементных ПЗС-фотоприемников, были успешно применены в приемных комплексах крупнейших отечественных радиотелескопов [1–5].

К числу таких разработок относятся рассмотренные в данной статье оптоэлектронные

устройства на основе фурье-процессоров для обработки сигналов пульсаров в приемном комплексе радиотелескопа РТ-64 (г. Калязин) и для формирования радиоизображения Солнца на Сибирском солнечном радиотелескопе.

Акустооптический процессор для регистрации импульсов радиоизлучения пульсаров

Особенности радиоизлучения пульсаров. В наблюдательной радиоастрономии и астрофизике объектами изучения являются пульсары – вращающиеся нейтронные звезды. Известно, что радиоизлучения пульсаров, поступающие к наблюдателю после прохождения через диспергирующую межзвездную среду (слабо ионизированную плазму), представляют собой импульсную последовательность сложных радиосигналов с внутримпульсной частотной модуляцией естественного происхождения [6].

Из-за дисперсии межзвездной среды импульс излучения пульсара появляется сначала на более высокой частоте приема, а затем – на более низкой частоте (дисперсионное запаздывание импульса). В случае приема сигнала на разных частотах f_1 и f_2 дисперсионная задержка по времени Δt_{DM} будет определяться следующим выражением [6]:

$$\Delta t_{DM} = \frac{e^2}{2\pi \cdot m_e c} \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) DM, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; m_e – масса электрона; c – скорость света; DM – мера дисперсии, определяемая числом свободных электронов по лучу зрения ($DM = \int n_e dl$, n_e – концентрация электронов в плазме).

Таким образом, дисперсия препятствует расширению полосы приемника с целью увеличения

его чувствительности, ограничивая ее величиной $\delta f_R = \alpha_{DM} \cdot \delta t$, где δt – требуемое временное разрешение; $\alpha_{DM} = df/dt$ – скорость дрейфа радиоизлучения в полосе приема. Это ограничение можно преодолеть путем суммирования сигналов многих узкополосных каналов после компенсации дисперсионных задержек в каждом из этих каналов.

Известны додетекторные (когерентные) и последетекторные (некогерентные) компенсаторы дисперсии сигналов пульсаров [6, 7]. Оба типа компенсаторов основаны на спектральном разложении сигналов. Когерентные компенсаторы обычно строятся на основе большого числа заказных или универсальных цифровых процессоров, Они достаточно сложны (свертка с импульсной характеристикой среды во временной или частотной областях). Последетекторные системы обычно строятся на основе фильтровых приемников [7]. Однако требуемое большое (больше 100) число частотных (спектральных) каналов в фильтровых системах реализовать сложно. Как указывалось выше, в радиоастрономии и других областях для спектральной обработки широкополосных сигналов с большим числом спектральных каналов эффективно применение акустооптических методов [8, 9].

Акустооптический процессор для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров. Структурная схема предложенного нами акустооптического (АО) процессора для регистрации радиоизлучения пульсаров приведена на рис. 1 [2, 4, 10]. В принципе, она соответствует традиционной схеме АО спектроанализатора (АОС) с пространственным интегрированием, однако в ней, как пояснено ниже, используется специальный режим работы ПЗС-фотоприемника.

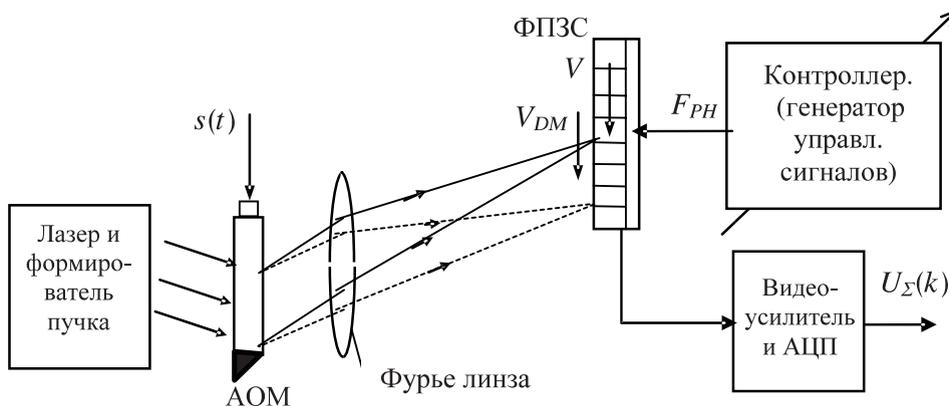


Рис. 1. Структурная схема АО пульсарного процессора



В обычных АОС распределение интенсивности света $I(x, t)$ в выходной плоскости линзы отражает спектр мощности $S(f)$ анализируемого сигнала $s(t)$, оно детектируется и накапливается во времени N -элементным ПЗС-фотоприемником (ФПЗС). Это распределение считывается в виде последовательности отсчетов $s_n \sim S(f_n)$ и регистрируется в цифровом виде. Многократное считывание образует массив отсчетов $S_{n,k}$, где n – номер канала; k – номер отсчета во времени.

Для устранения влияния дисперсии при наблюдениях пульсаров необходимо суммирование отсчетов из массива $S_{n,k}$ по алгоритму:

$$s_{\Sigma}(k) = \sum_{n=1}^N s_{n,k+\Delta \cdot n} \quad (2)$$

Здесь Δ – соответствующий сдвиг во времени, компенсирующий дисперсионное запаздывание (зависит от шага расположения частотных каналов АОС и меры дисперсии наблюдаемого пульсара). Суммирование (2) повышает также отношение сигнал/шум (с/ш) в \sqrt{N} раз.

В предложенном нами АО процессоре в отличие от обычного АО фурье-процессора ФПЗС работает в специальном конвейерном режиме (shift-and-add mode – режим временной задержки и накопления), который обеспечивается контроллером – генератором управляющих сигналов. В этом режиме ФПЗС одновременно выполняет и функции многоканального детектора, и функции многоотводной суммирующей линии задержки. Образующие в ФПЗС потенциальные ямы – «элементы» (линейный массив) перемещаются вдоль апертуры ФПЗС от одного края к другому подобно непрерывной цепочке (конвейеру). При перемещении каждый из элементов выполняет накопление сигналов из формируемых частотных каналов, с соответствующей задержкой Δ , проходя их один за другим, так, что суммирование (2) выполняется в реальном времени внутри ФПЗС аналоговым способом (в виде зарядовых пакетов) перед выводом сигналов из ФПЗС. Задержка Δ определяется внешним управлением (частотой F_{ph} , $\Delta = 1/F_{ph}$) и может быть согласована с высокой точностью с дисперсионной задержкой в принимаемом радиоизлучении. При поступлении в АО процессор широкополосного радиоизлучения пульсара выходной сигнал $U_{\Sigma(k)}$ содержит составляющую, соответствующую огибающей импульса радиоизлучения пульсара, сжатого по сравнению с выходным сигналом обычного широкополосного приемника.

Нами был создан рабочий образец АО компенсатора дисперсии с АОМ на основе кристалла TeO_2 с центральной частотой $f_0 = 150$ МГц, рабочей полосой частот $\Delta f_A = 80$ МГц и шагом следования частотных каналов δf_A около 82 кГц. Использовался ФПЗС типа ILX-703A (Sony), и контроллер обеспечивал перестройку процессора для обработки сигналов пульсаров с мерой дисперсии DM от 15 до 1000 парсек/см³.

Применение АО процессора на радиотелескопе РТ-64. Образец АО процессора был установлен в пульсарном приемном комплексе радиотелескопа РТ-64 с диаметром антенны 64 м в Калязинской радиоастрономической обсерватории ФИАН в приемнике диапазона 1,4 ГГц. Регистрировались профили импульсов различных пульсаров с разными потоками S и периодами T_p повторения импульсов как секундных, так и миллисекундных [10, 11]. В таблице представлены профили некоторых пульсаров, зарегистрированные на РТ-64 и для сравнения на 100-метровом Боннском радиотелескопе (из каталога <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data>).

В долговременных прецизионных измерениях в АО спектроанализаторах наблюдается изменение (дрейф) их частотной шкалы. Из-за частотно-временной связи в радиоизлучении пульсаров изменение частотной шкалы АО процессора приводит к временному смещению выделенного импульса, т. е. к ошибке в определении момента его прихода. Изменение частотной шкалы связано, главным образом, с изменением скорости акустических волн в кристалле АО модуляторов из-за изменения их температуры [27]. В мировой практике в обсерваториях используют термостабильное помещение, а также дополнительную термостабилизацию блока с АОС [9].

Нами разработан «активный» метод калибровки частотной шкалы АО процессора [12]: периодическая автоматизированная калибровка в реальном времени по гребенке частотных реперных сигналов от генератора гармоник, стабилизированного прецизионным генератором 5 МГц (водородные стандарты частоты Службы времени радиотелескопа). По частотам гармоник и положениям их откликов на частотной шкале АОС (номера каналов n) методом наименьших квадратов строится аппроксимирующая зависимость $f_{A(n)} = an^2 + bn + c$ – частотная шкала АОС. Наши измерения показали, что точность калибровки частотной шкалы, определяемая по среднеквадрата

Профили импульсов радиоизлучения ряда пульсаров

Пульсары	РТ-64 г. Калязин	Effelsberg
1. PSR 2111+46 $DM=141,50$ $T_p=1,015$ $S=141,5$ мЯн		
2. PSR 2021+51 $DM=22,58$ $T_p=0,529$ с $S=19$ мЯн		
3. PSR 1713+07 $DM=15,993$ $T_p=4,57$ мс $S=4$ мЯн		

тичному отклонению при аппроксимации, весьма высока и составляет 4 кГц, что соответствует 5 % от шага расположения δf_A частотных каналов рабочего образца АО процессора.

С учетом частотной калибровки шкалы АО процессора достижимая точность определения временного положения импульсов миллисекундного пульсара PSR 1937+21 с $DM=71,02$ составляет 1,5 мкс, что значительно лучше, чем приведенные результаты тайминга этого пульсара в НИИ Связи Японии [9, 13].

Высокая точность измерения положения импульсов позволяет использовать АО пульсарный процессор совместно со штатным фильтровым Пульсарным комплексом АС-600/128 диапазона 600 МГц (с полосой $3,2 \times 2$ МГц [7]) для точного измерения дисперсионных задержек на частотах 1400 и 600 МГц (1), и, таким образом, проводить «автономные» на одном радиотелескопе измерения DM с точностью, сравнимой с точностью совместных интерферометрических наблюдений на базе Калязин – Касима (Япония) в диапазоне 2200 МГц [13]. Результаты, полученные нами для PSR 1937+21, приведены в [11].

Двухканальный АО пульсарный процессор – поляриметр. На основе двухканального АО процессора с совместным преобразованием Фурье возможно дальнейшее развитие АО пульсарного процессора: построение компенсатора дисперсии – поляриметра. Двумерное распределение дифрагированного света в выходной плоскости АО про-

цессора отражает амплитудные, спектральные и фазовые соотношения в радиосигналах, формируя в выходной плоскости помимо спектров еще и интерферограмму вдоль «фазовой» оси, ортогональной направлению распространения акустических волн в АОМ, соответствующему «частотной» оси выходного распределения. При подаче на входы АОМ радиосигналов с ортогональных облучателей антенны радиотелескопа фазовые соотношения в радиосигналах отражают поляризацию принимаемого радиоизлучения.

Оптическую схему процессора поясняет рис. 2. Здесь s_1 и s_2 – сигналы, соответствующие ортогонально поляризованному компонентам E_x и E_y принимаемого радиоизлучения. Отличительная особенность схемы – работа матричного ПЗС-фотоприемника в конвейерном режиме по частотной оси: вдоль столбцов (по оси x) с регистрацией интерферограммы вдоль строк (по оси y).

Интенсивность I выходного оптического распределения, пропорциональная квадрату модуля фурье-образа амплитудно-фазового распределения (АФР) на выходе АО модулятора, имеет следующий вид:

$$I \sim |F_y|^2 = D^2 \cdot \text{sinc}^2(\pi \cdot \xi_y \cdot D) \times [B + A \cdot \cos\{2\pi \cdot \xi_y \cdot h + \tilde{\varphi}\}], \quad (3)$$

где $B = |S_1^x(\xi_x)|^2 + |S_2^x(\xi_x)|^2$, $A = 2 \cdot |S_1^x(\xi_x)| \cdot |S_2^x(\xi_x)|$, $\tilde{\varphi} = \arg[S_1^x(\xi_x)] - \arg[S_2^x(\xi_x)]$; ξ_x, ξ_y – пространственные частоты входного АФР; $|S_{1,2}^x(\xi_x)| = |F_x\{s_{1,2}\}|$ –

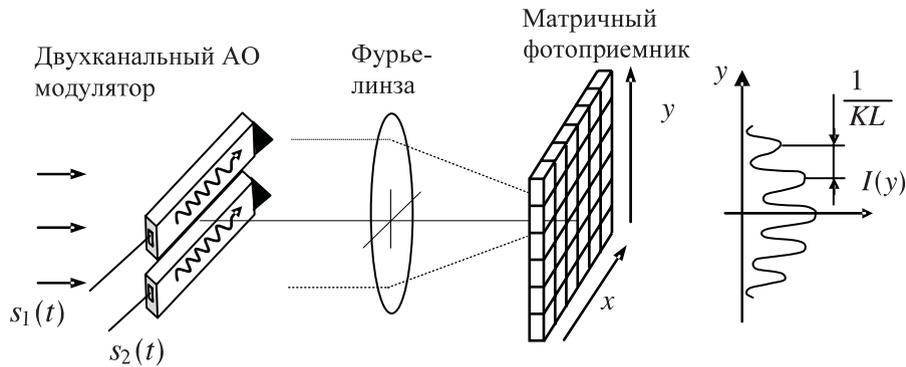


Рис. 2. Оптическая схема двухканального АО пульсарного процессора

спектральная плотность входных сигналов s_1 и s_2 ; $F_{x,y}\{\dots\}$ – оператор преобразования Фурье вдоль осей x и y , соответственно; h – расстояние между осями каналов АОМ; D – ширина каналов. Распределение I имеет интерференционную структуру по оси $y(\xi_y)$, отражающую взаимно-корреляционные свойства сигналов s_1 и s_2 . При работе процессора по сигналам пульсаров формирование интерференционной структуры происходит в пределах всей протяженности сжатого импульса [11, 14].

Обработка полученной интерференционной картины предусматривает получение оценок B^* , A^* , φ^* ее параметров и расчет по ним параметров Стокса $\{I, Q, U, V\}$ по методике, приведенной в [15].

Нами в оптическом пакете GLAD (www.aog.com) выполнено компьютерное моделирование преобразования сигналов в таком процессоре: расчет интерференционной картины в его выходной плоскости при подаче на входы модулятора радиосигналов с контролируемым фазовым сдвигом и отношением $c/\text{ш} \ll 1$ (что отражает реальную ситуацию в радиоастрономических наблюдениях). Рис. 3 поясняет формирование интерференционной картины, здесь приведены ее сечения по частотной (x) и фазовой (y) координатам. Рис. 3, *a* – это мгновенное распределение (при $s_1 = s_2$ и отношении $c/\text{ш} = -20$ дБ на входах АОМ), а рис. 3, *б* – результат накопления сигнала в ФПЗС [14, 15].

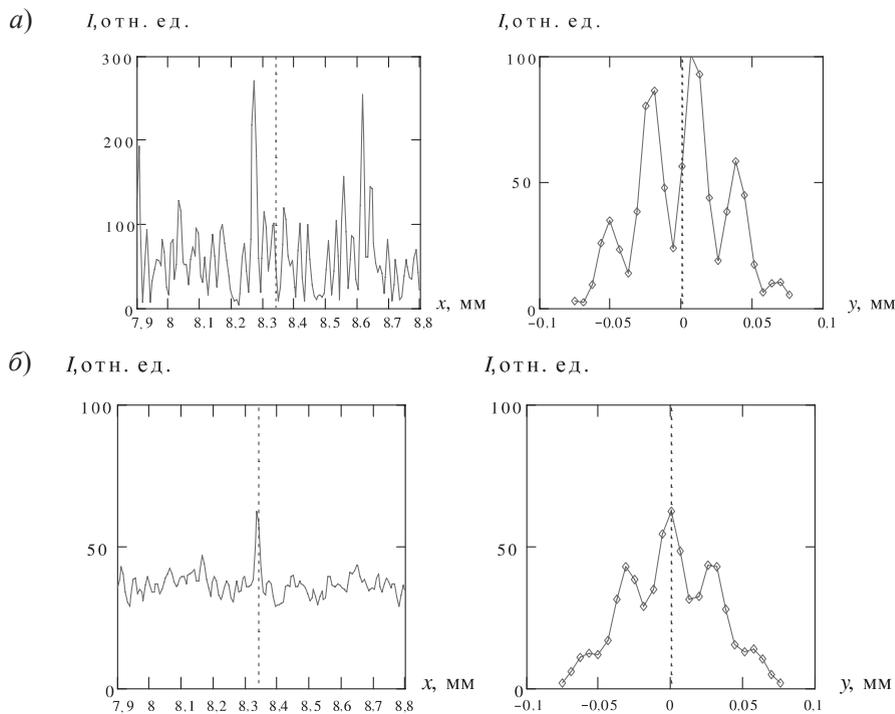


Рис. 3. Сечения выходного распределения в двумерном АО пульсарном процессоре

Помимо моделирования были проведены и экспериментальные исследования работы лабораторного макета процессора [15]. Сигналы пульсаров имитировались ЛЧМ радиоимпульсами, производилось сжатие импульсов и регистрация и обработка интерферограммы. При известной частоте интерференции измерение фазового сдвига выполнялось по алгоритму оптимального измерения фазы для сигнала известной частоты.

Таким образом, выполненные исследования возможностей двумерного фурье-процессора на основе двухканального АО модулятора показывают перспективность развития этого направления при разработке пульсарного процессора нового типа. Следует также отметить, что использование ПЗС-фотоприемников в режиме временной задержки и накопления открывает новое направление построения оптоэлектронных процессоров конвейерного типа, примерами которых являются, в частности, процессоры для сжатия радиосигналов с линейной и дискретно-частотной модуляцией и оптических сигналов с линейной модуляцией по длине волны и др. [16–18].

Акустооптическая система формирования радиоизображения для Сибирского солнечного радиотелескопа

Акустооптические процессоры могут быть использованы в радиоастрономии для синтеза изображений в радиотелескопах параллельного апертурного синтеза, использующих как фазовый, так и частотный методы формирования многолучевых диаграмм направленности. Однако в первом случае АО устройства должны быть выполнены на основе пространственно-многоканальных акустооптических модуляторов с большим числом каналов, равным числу элементов антенной системы (десятки и сотни), что значительно затрудняет их разработку. Поэтому предлагавшиеся проекты создания многоканальных АО диаграммоформирующих устройств для систем апертурного синтеза [19, 20] не были реализованы. В то же время формирование многолучевых диаграмм направленности в системах с частотнозависимым положением луча может быть реализовано достаточно просто при использовании пространственно одноканальных АО фурье-процессоров [21, 22].

Один из крупнейших радиогелиографов, Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ), предназначенный для детального исследования солнечной активности по радиоизлучению в сан-

тиметровом диапазоне волн, относится к таким системам, где используется частотный метод управления синтезированным лучом для формирования многолучевой диаграммы направленности [23]. Разработанное в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете в течение 1986–1990 гг. устройство формирования радиоизображения Солнца для ССРТ на основе АО фурье-процессора было совместно с сотрудниками Института солнечно-земной физики РАН (ИСЗФ) применено в составе действующего приемного комплекса ССРТ при тестовых измерениях и проведении пробных наблюдений локальных источников [24]. В дальнейшем на его основе в ИСЗФ была разработана постоянно действующая приемно-регистрирующая система, с помощью которой были получены новые данные по динамике нестационарных явлений в хромосфере Солнца [25, 28].

Принцип формирования радиоизображения Солнца на ССРТ. Антенная система ССРТ представляет собой многоэлементный крестообразный интерферометр типа креста Миллса [23]. Диаграмма направленности в корреляционном режиме в общем случае описывается соотношением [26]:

$$P(\vartheta, \varphi, \nu) = \sin\left(N \frac{\pi d \nu}{c} \sin \vartheta\right) \sin\left(N \frac{\pi d \nu}{c} \sin \varphi\right) = F(\vartheta, \varphi) \frac{\sin\left(\frac{\pi d \nu}{c} \sin \vartheta\right) \sin\left(\frac{\pi d \nu}{c} \sin \varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi d \nu}{c} \sin \vartheta\right) \sin\left(\frac{\pi d \nu}{c} \sin \varphi\right)}, \quad (4)$$

где ϑ, φ – углы, отсчитываемые от нормалей к линиям антенн в плоскостях, содержащих источник излучения и плечо Запад-Восток и Север-Юг, соответственно; $F(\vartheta, \varphi)$ – диаграмма направленности (по мощности) отдельной антенны; d – шаг расположения антенн радиоинтерферометра; N – количество антенн в линейном интерферометре (для ССРТ $N = 128$); ν – частота принимаемого сигнала; c – скорость распространения радиоволны.

Известно, что (4) соответствует системе интерференционных максимумов (лучей) для каждой фиксированной частоты ν . При изменении частоты меняется пространственное положение системы интерференционных максимумов (исключая нулевые), – лучи «сканируют» с относительной углочастотной скоростью:

$$\frac{d\vartheta}{d\nu} = - \frac{\operatorname{tg} \vartheta}{\nu} p \quad (5)$$

(соотношения для φ имеют аналогичный вид).



Здесь $p = 0, 1, 2, \dots$, – номера интерференционных порядков.

Теперь пространственное распределение радиояркости в области p -го интерференционного порядка радиотелескопа может быть представлено в виде:

$$G(\vartheta_p - \vartheta_{0p}) = G(f_p(v - v_0)) = K_p S_p(v), \quad (6)$$

где функция $f_p(v - v_0)$, определяемая соотношением (5), устанавливает для малых приращений угла и частоты линейную зависимость между ними. Отсюда также следует линейная связь $G(\vartheta)$ со спектром мощности принимаемого излучения $S(v)$, обозначенная в (6) коэффициентом K_p . Очевидно, что полоса частот Δv_p , необходимая для сканирования луча в области $\Delta \vartheta_p$ вблизи направления ϑ_{0p} , зависит от номера порядка p , как это следует из (5). Таким образом, пространственную структуру протяженных радиоисточников с достаточно широким спектром излучения можно регистрировать, измеряя спектральное распределение мощности принимаемого сигнала.

Обработка сигналов ССРТ в акустооптическом приемном устройстве. Принцип формирования радиоизображения Солнца в акустооптоэлектронном приемном устройстве можно пояснить с помощью упрощенной функциональ-

ной схемы, приведенной на рис. 4. Высокочастотный сигнал с выхода антенно-фидерного тракта преобразуется в полосу промежуточных частот, усиливается и подается на вход акустооптического спектроанализатора. Схема АОС представляет собой традиционную схему АО фурье-процессора с пространственным интегрированием и включает источник коллимированного когерентного света, акустооптический дефлектор, фурье-объектив и многоэлементный ПЗС-фотоприемник. Система сбора и обработки данных на базе персонального компьютера обеспечивает обработку выходных сигналов АОС и управление работой низкочастотной части приемника.

На рис. 4 также условно изображены набор частотных лучей линейного радиоинтерферометра и соответствующий ему «веер» оптических лучей на выходе АОС, иллюстрирующие непосредственную зависимость между угловым положением дифрагировавшего в АОС пучка света и угловым положением луча радиоинтерферометра для той же спектральной компоненты сигнала. Действительно, для АОС угол дифракции света связан с частотой соотношением [27]:

$$\theta(v - v_0) \cong \theta_0 + \frac{\lambda_l}{V_c \cos \theta_0} (v - v_0), \quad (7)$$

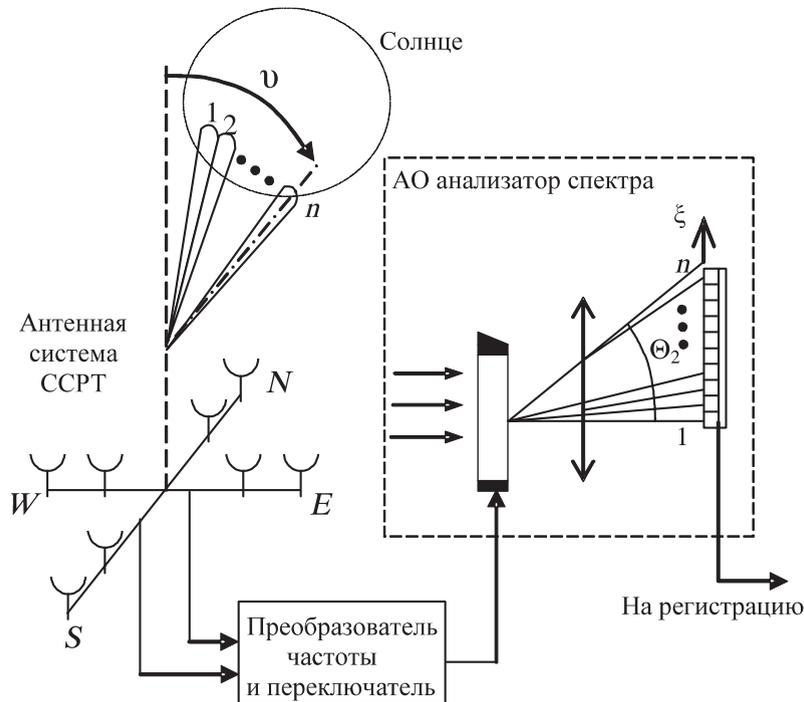


Рис. 4. Принцип формирования радиоизображения Солнца в акустооптоэлектронном приемном устройстве

где $\theta_0 = \theta(\nu_0)$ – угол дифракции АО дефлектора на промежуточной частоте, соответствующей центральной входной частоте ν_0 , λ_l – длина волны излучения лазера; V_a – скорость акустической волны в кристалле дефлектора.

Теперь, пользуясь (5), можно получить:

$$\delta\theta \cong \delta\vartheta_p \frac{2\lambda_l}{V_a \cos\theta_0 \cdot \text{tg}\vartheta_{p0}} \quad (8)$$

с точностью до малых поправок. В этом соотношении $\delta\theta$ – изменение углового положения луча на выходе АО фурье-процессора (в пространстве изображений), соответствующее изменению положения луча радиоинтерферометра (в пространстве источников) в области интерференционного порядка с номером :

$$\delta\vartheta_p = \vartheta_p(\nu) - \vartheta_{p0}$$

Линейная зависимость между $\delta\theta$ и $\delta\vartheta_p$, устанавливаемая (8), является основой для формирования на выходе АОС оптической модели сечения радиоизображения Солнца.

Принципиально важной особенностью АОП является возможность формировать значительно

большее, чем в электронном фильтровом приемнике, количество элементарных фильтров (до нескольких тысяч), причем характеристики всех этих фильтров будут практически одинаковыми. Объединяя полосы этих фильтров путем суммирования сигналов с m соседних элементов многоэлементного фотоприемника, можно сформировать требуемую полосу канала, которая должна изменяться в процессе наблюдений в соответствии с изменением положения Солнца.

Некоторые результаты, полученные на ССРТ в аддитивном режиме с применением АОП, показаны на рис. 5–6 [27, 28]. На рис. 5 приведены кривые прохождения для интенсивности и поляризации в одном частотном канале. Рис. 6 иллюстрирует одномерные сечения распределения радиояркости Солнца непосредственно перед и в максимуме вспышки, полученные с помощью АОП при временном разрешении около 50 мс [28].

Применение оптической обработки сигналов дает также возможность формировать радиоизображение в корреляционном режиме работы

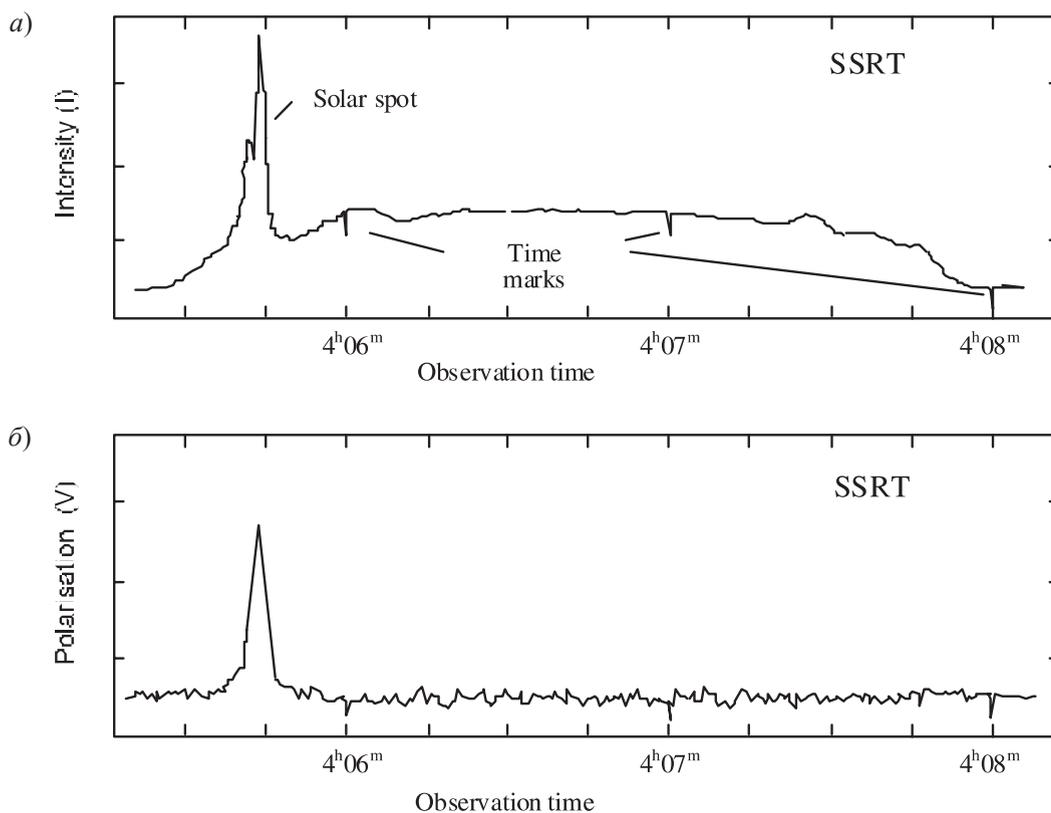


Рис. 5. Профиль локального источника в интенсивности (а) и поляризации (б), полученные в одном из каналов акустооптоэлектронного приемника

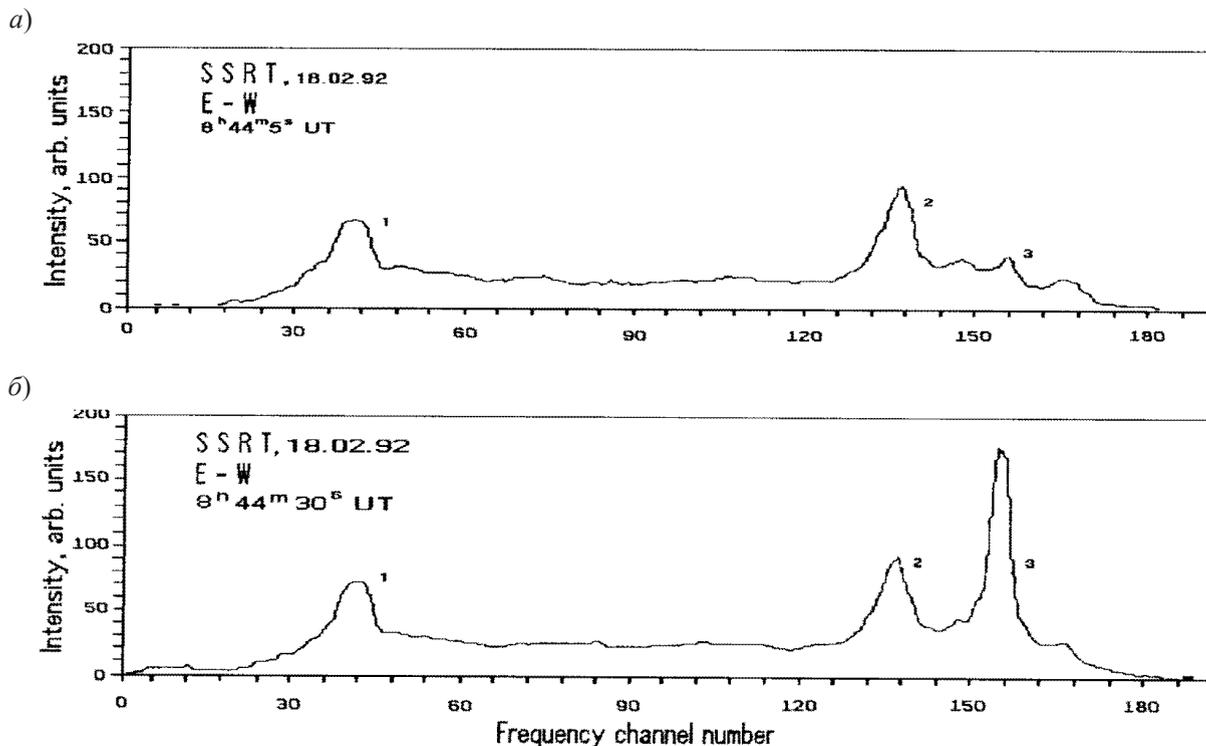


Рис. 6. Одномерные сечения радиояркости Солнца для локального источника № 3:
а – перед вспышкой; *б* – в максимуме вспышки

радиотелескопа за счет непосредственного вычисления взаимного спектра сигналов ортогональных плеч радиотелескопа. Эта операция может быть выполнена в двумерном АО процессоре с совместным преобразованием Фурье – спектрокорреляторе [1, 20].

Тестовые измерения и длительные наблюдения на ССРТ с акустооптоэлектронным приемным устройством подтвердили достоинства АОП и обеспечили получение новых наблюдательных

данных о динамических процессах в солнечной атмосфере [28].

Результаты проведенных исследований оптоэлектронных процессоров, а также внедрение выполненных разработок в практику радиоастрономических наблюдений свидетельствуют об успешной реализации идей и методов когерентной оптической обработки информации, в развитии которых значительная роль принадлежит Неле Александровне Есепкиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есепкина, Н.А. Акустооптический спектрокоррелятор для радиогелиографа [Текст]/Н.А. Есепкина, М.И. Мансырев, С.А. Молодяков, И.И. Саенко// Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.–1990.–Т. 33.–№ 8.–С. 91–94.
2. Esepkina, N.A. Acousto-optical processors for radioastronomy [Текст]/N.A. Esepkina, A.P. Lavrov, I.I. Saenko//Turkish J. of Physics.–1995.–Vol. 19.–№ 10.–P. 1205–1210.
3. Esepkina, N.A. Acoustooptical Receiving System for Radioimage Formation at the Siberian Solar Radiotelescope [Текст]/N.A. Esepkina, S.A. Molodyakov, I.I. Saenko//Photonics and Optoelectronics.–1998.–Vol. 5.–№ 2.–P. 63–72.
4. Есепкина, Н.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров [Текст]/Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, С.А. Молодяков//Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника.–1998.–Вып. 2.–С. 21–29.
5. Есепкина, Н.А. Спектральные наблюдения в 3-мм диапазоне длин волн на радиотелескопе РТ-22 КрАО с использованием акустооптического анализатора спектра [Текст]/Н.А. Есепкина, И.И. Зинченко, И.И. Саенко [и др.]//Изв. вузов. Сер. Радиофизика.–2000.–Т. XLIII.–№ 11.–С. 935–941.
6. Манчестер, Р. Пульсары. [Текст]/Р. Манчестер, Дж. Тейлор. –М.: Мир, 1980.–315 с.

7. **Илясов, Ю.П.** Пульсарный комплекс ФИАН на радиотелескопе ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине [Текст]/Ю.П. Илясов, В.В. Орешко, О.В. Дорошенко//Тр. ФИАН.–2000.–Т. 229.–С. 95–104.
8. **Келлман, П.** Интегрирующие приемники с акустооптическим разделением каналов [Текст]/П. Келлман, Х.Н. Шейвер, Дж.У. Марри //ТИИЭР.–1981.–Т. 69.–№ 1.–С. 108–117.
9. **Hanado, Y.** Millisecond Pulsar Observation System Using Acousto-Optic Spectrometer [Текст]/Y. Hanado, M. Imae, M. Sekido//IEEE Trans. On Instrum. and Measurement.–1995.–Vol. 44. № 2.–P. 107–109.
10. **Есепкина, Н.А.** Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров [Текст]/Н.А. Есепкина, Ю.П. Илясов, А.П. Лавров, С.А. Молодяков//Письма в ЖТФ.–2003.–Т. 29.–Вып. 21.–С. 32–39.
11. **Есепкина, Н.А.** Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров [Текст]/Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, С.А. Молодяков//Антенны.–2006. № 7.–С. 69–76.
12. **Esepkina, N.A.** Acoustooptical pulsar processor frequency scale calibration for increase accuracy measurement of time of arrival radioemission impulses [Текст]/N.A. Esepkina, A.P. Lavrov, S.A. Molodyakov//Proc. SPIE.–2005.–Vol. 5447.–P. 35.
13. **Илясов, Ю.П.** Результаты двухчастотного хронометрирования пульсара В 1937+21 в Калязине и Кашиме в 1997–2002 гг. [Текст]/Ю.П. Илясов, М. Имае, Ю. Ханодо [и др.]//Письма в *Астрономический журнал*.–2005.–С. 33–38.
14. **Lavrov, A.P.** Output plane interference pattern handling at the two-channel acoustooptical processor of pulsars' radioemission [Текст]/A.P. Lavrov, E.V. Dmitriev//Proc. SPIE.–2007.–Vol. 6594, 659412, doi: 10.1117/12.725623.
15. **Лавров, А.П.** Акустооптические процессоры в радиоастрономических приемниках [Текст]/А.П. Лавров, С.А. Молодяков, И.И. Саенко//Антенны.–2009.–№ 7.–С. 45–54.
16. **Есепкина, Н.А.** Исследование выходного сигнала акустооптического процессора для обработки ЛЧМ сигналов большей длительности [Текст]/Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, М.Н. Ананьев//Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.–1990.–Т. 33.–№ 8.–С. 51–55.
17. **Есепкина, Н.А.** Акустооптический процессор радиосигналов с дискретной частотной модуляцией [Текст]/Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, С.В.Дмитриев//Письма в ЖТФ.–1997.–Т. 23.–№ 2.–С. 12–19.
18. **Есепкина, Н.А.** Использование сканирующего ПЗС-фотоприемника для сжатия оптических сигналов с линейной модуляцией по длине волны [Текст]/Н.А. Есепкина, А.П. Лавров//Письма в ЖТФ.–1997.–Т. 23.–№ 1.–С. 77–83.
19. **McLean, D.J.** [Текст]/D.J. McLean, L.B. Lambert, M. Arm [et al.]//Proc. I.R.E. of Australia.–1967.–№ 28.–P. 375.
20. **Kai, K.** Acousto-optical image processor for radiointerferometer at 160 MHz frequency [Текст]/K. Kai, T. Kosugi//Image Formation From Coherence Functions in Astronomy; ed. by C.Van Schooneveld.–D. Reidel Publishing Comp.–1979.–P. 320.
21. **Саенко, И.И.** Обработка сигналов радиогелиографа в акустооптическом приемном устройстве [Текст]/И.И. Саенко, С.А. Молодяков//18 Всесоюзная конф. по радиоастрономии. Радиоастрономическая аппаратура. Ереван: Тез. докл.–1985.–С. 360.
22. **Lovberg, J.** Real-Time Millimeter-Wave Imaging Radiometer for Avionic Synthetic Vision [Текст]/J. Lovberg, R.C. Chou, C. Martin//Proc. SPIE.–1994.–Vol. 2220.–P. 234–244.
23. **Smolkov, G.Ya.** [Текст]/G.Ya. Smolkov, A.A. Pistolkors, T.A. Treskov [et al.]//Astrophysics and Space Science.–1986.–№ 119.–P. 1.
24. **Гречнев, В.В.** Исследование макета акустооптоэлектронного приемника на Сибирском солнечном радиотелескопе [Текст]/В.В. Гречнев, Н.А. Есепкина, В.Г. Занданов [и др.]// Письма в ЖТФ.–1988.–Т. 14.–Вып. 7.–С. 581–585.
25. **Алтынцев, А.Т.** Наблюдения всплесков микроволнового излучения Солнца на Сибирском солнечном радиотелескопе с 50-миллисекундным разрешением [Текст]/А.Т. Алтынцев, В.В. Гречнев, Н.А. Есепкина, [и др.]//Препринт ИСЗФ СО РАН.–Иркутск.–1992.–№ 11–92.–15 с.
26. **Christiansen, W.N.** Radiotelescopes. [Текст]/W.N. Christiansen, J.A. Hogbom; 2-nd ed.–Cambridge Univ.Press, 1985.
27. **Korpel, A.** Acousto-optics, in Applied Solid State Science, [Текст]/A. Korpel; R.Wolf, Ed., New York: Academic Press.–1972.–Vol. 3.–P. 73–179.
28. **Grechnev, V.V.** The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data [Текст]/V.V. Grechnev, S.V. Lesovoi, G.Ya. Smolkov [et al.]// Solar Physics.–2003.–216(1),–P. 239–272.



ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Атмосферный озон O_3 защищает биосферу Земли от губительного ультрафиолетового излучения Солнца в диапазоне УФ-Б (280–315 нм). Поглощение озоном солнечного излучения является основным источником нагрева стратосферы (высоты 15–50 км) [1]. Пространственно-временное распределение озона в атмосфере определяет количество, локализацию и вариации поглощенной энергии, что, в свою очередь, влияет на характеристики атмосферы. Таким образом, изменения в озоновом слое самым тесным образом связаны с изменениями климата Земли, влияют на температурный режим и динамику атмосферы, а также на биосферу. Поэтому проблема надежного мониторинга озонового слоя атмосферы – одна из наиболее актуальных экологических проблем.

Работающие сейчас немногочисленные спутниковые приборы, выполняющие лимбовые измерения вертикального распределения озона, не обеспечивают высокого пространственного разрешения в горизонтальном направлении и не позволяют получать достаточно плотные непрерывные ряды данных о содержании озона над выбранным пунктом. Кроме того, спутниковые приборы нуждаются в периодической калибровке данных наземными средствами.

Все это определяет потребность в оперативных и надежных методах наземных измерений пространственно-временного распределения атмосферного озона и разработке соответствующих приборных комплексов. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых (ММ) радиоволнах является одним из наиболее эффективных методов решения этой задачи. По форме уширенных давлением вращательных спектральных линий собственного теплового излучения озона, измеренных с поверхности Земли, можно определить вертикальное распределение озона в атмосфере на высотах примерно от 12 до 75 км над пунктом наблюдения [2, 3]. Важными

достоинствами радиофизических методов зондирования озона и других малых газовых составляющих атмосферы являются возможность непрерывных круглосуточных измерений, широкий диапазон зондируемых высот, малая зависимость от погодных условий при наземных наблюдениях, относительно низкая стоимость аппаратуры.

Для реализации перечисленных достоинств дистанционного зондирования атмосферы на ММ волнах необходимы высокочувствительные радиометры и широкополосные, с полосой анализа в несколько сотен мегагерц, стабильные и надежные спектрометры, среди которых важное место занимают акустооптические спектрометры (АОС).

Работы по созданию таких устройств для радиоастрономических наблюдений в течение ряда лет проводились в СПбГПУ по инициативе и под руководством профессора Н.А. Есепкиной, одной из первых в нашей стране организовавшей лабораторию по проведению исследований и разработок в области прикладной акустооптики и оптоэлектроники. В конце 90-х гг. совместно с сотрудниками Физического института имени П.Н. Лебедева (ФИАН) были начаты работы по созданию акустооптического спектрометра для комплекса дистанционного зондирования атмосферы.

В данной статье кратко рассмотрено функционирование широкополосного оптоэлектронного спектрометра, разработанного в СПбГПУ на основе акустооптического спектроанализатора, в составе радиометрического комплекса ММ диапазона волн, созданного в ФИАН для исследований атмосферного озона на частоте 142 ГГц.

Озонометрический комплекс с АОС

Основные функциональные связи спектрометра с приемным комплексом озонометра показаны на упрощенной структурной схеме рис. 1.



Рис. 1. Общая структурная схема озонметра ММ диапазона с АО спектрометром

Входная часть радиометрического комплекса представляет собой двухлучевой модуляционный супергетеродинный приемник излучения двухмиллиметрового диапазона. В состав приемника входят квазиоптический антенный блок, преобразовательно-усилительный тракт и система стабилизации частоты гетеродина. Антенный блок обеспечивает прием сигнала под зенитным углом около 60° , что близко к оптимальному значению для широкого диапазона условий наблюдения. Антенный блок имеет два практически идентичных входа, переключаемых вращающимся плоским зеркалом модулятора с частотой 75 Гц. Ширина осесимметричных гауссовых ДН входных лучей составляет около $1,5^\circ$ по уровню -3 дБ при диаметрах входных линз 120 мм.

При наблюдениях один из лучей («опорный») перекрывается поглощающей нагрузкой, охлажденной жидким азотом и имеющей яркостную температуру $T_c = 110$ К. Вторым лучом («сигнальный») направлен на небо, для которого частотная зависимость яркостной температуры определяется, в основном, вращательной спектральной линией озона с центральной частотой 142,175 ГГц (переход $10_{0,10} - 10_{1,9}$). При калибровке приемника этот луч перекрывается нагрузкой, находящейся при комнатной температуре T_0 .

Шумовой сигнал от неба или от поглощающей нагрузки складывается в диплексере с монохроматическими колебаниями первого гетеродина с частотой 140,42 ГГц и через скалярный рупор поступает в смеситель. Смеситель на планарном диоде с барьером Шоттки преобразует полосу

шириной около 0,5 ГГц, содержащую озонную линию, в полосу частот АОС (1,5–2,0 ГГц). Изменением разности хода диплексера приемник настраивается на работу в двухполосном или однополосном режиме. Двухполосная шумовая температура приемника составляет 650–700 К в средней части анализируемой полосы частот. Система фазовой автоподстройки частоты первого гетеродина обеспечивает кратковременную (за 0,2 с) относительную стабильность его частоты около $2 \cdot 10^{-8}$.

Оптоэлектронный спектрометр состоит из двух основных частей: акустооптического фурье-процессора и системы сбора и обработки данных. Акустооптический процессор включает в себя гелий-неоновый лазер, анаморфотную систему коллимации оптического пучка, акустооптический дефлектор на кристалле LiNbO_3 (центральная частота 1750 МГц, временная апертура 1,5 мкс, эффективность $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1}$) и фурье-объектив. В выходной плоскости оптического процессора расположен линейный 2048-элементный фотоприемник (модель Sony ILX 703) на приборе с зарядовой связью (ПЗС) с размерами отдельного элемента $14 \times 14 \text{ мкм}^2$. Размеры оптического модуля составляют $40 \times 25 \times 12 \text{ см}^3$.

В выходной плоскости оптического процессора распределение освещенности в плоскости акустооптической дифракции линейно связано со спектральным распределением мощности принятого сигнала. Считывание этого распределения, его дискретизация и преобразование в электрический сигнал осуществляются ПЗС-фотоприемником.

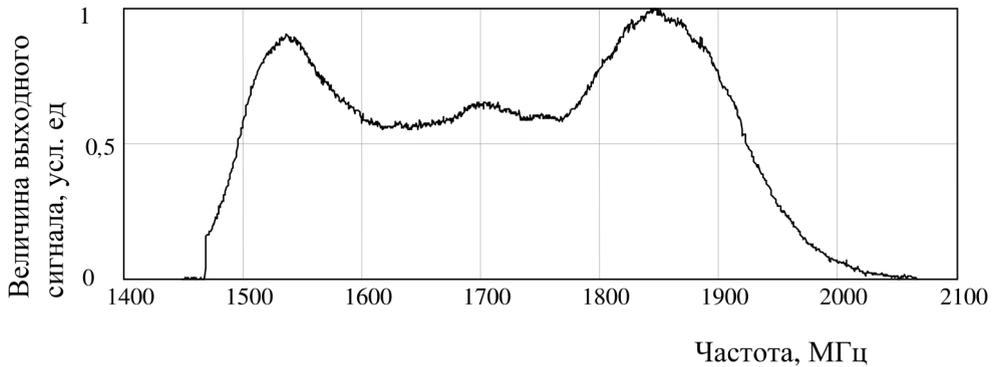


Рис. 2. Частотная характеристика АОС, измеренная по входному шумовому сигналу

Интегрирование зарядовых пакетов в элементах фотоприемника и их последовательный вывод из сдвигового регистра позволяют получить дискретизованный спектр сигнала. Полоса пропускания эквивалентного фильтра каждого канала и общее число каналов определяются характеристиками элементов оптического процессора и фотоприемника. При этом высокая точность настройки всей совокупности спектральных каналов обеспечивается высокой точностью расположения элементов фотоприемника.

Ширина полосы АОС по уровню -3 дБ достигает 450 МГц, что иллюстрируется его амплитудно-частотной характеристикой, измеренной по широкополосному шумовому сигналу и приведенной на рис. 2.

АОС имеет 1000 спектральных каналов. На рис. 3 показаны нормированные частотные характеристики отдельных каналов АОС. Из этого рисунка видно, что шаг следования каналов по частоте составляет около 0,6 МГц, а ширина полосы отдельного спектрального канала по уровню -3 дБ (т. е. частотное разрешение АОС) равна примерно 0,9 МГц.

Система сбора и предварительной обработки данных АОС состоит из аналого-цифровой и цифровой частей. Аналого-цифровая часть, непосредственно соединенная с выходом акустооптического процессора, включает в себя контроллер ПЗС-фотоприемника, два буферных регистра, видеоусилитель и АЦП. Цифровая часть состоит из сигнального процессора ADSP-2181 и схем, согласующих его взаимодействие с процессором компьютера и обеспечивающих обмен сигналами между сигнальным процессором и подключенными к нему внешними устройствами. Система сбора данных АОС обеспечивает управление работой ПЗС-фотоприемника по заданной программе и в темпе, определяемом частотой переключения входов радиометра, считывание и аналого-цифровое преобразование сигналов, предварительную цифровую обработку и их буферное накопление с последующей регистрацией в компьютере в виде файлов данных.

Система сбора и предварительной обработки данных АОС состоит из аналого-цифровой и цифровой частей. Аналого-цифровая часть, непосредственно соединенная с выходом акустооптического процессора, включает в себя контроллер ПЗС-фотоприемника, два буферных регистра, видеоусилитель и АЦП. Цифровая часть состоит из сигнального процессора ADSP-2181 и схем, согласующих его взаимодействие с процессором компьютера и обеспечивающих обмен сигналами между сигнальным процессором и подключенными к нему внешними устройствами. Система сбора данных АОС обеспечивает управление работой ПЗС-фотоприемника по заданной программе и в темпе, определяемом частотой переключения входов радиометра, считывание и аналого-цифровое преобразование сигналов, предварительную цифровую обработку и их буферное накопление с последующей регистрацией в компьютере в виде файлов данных.

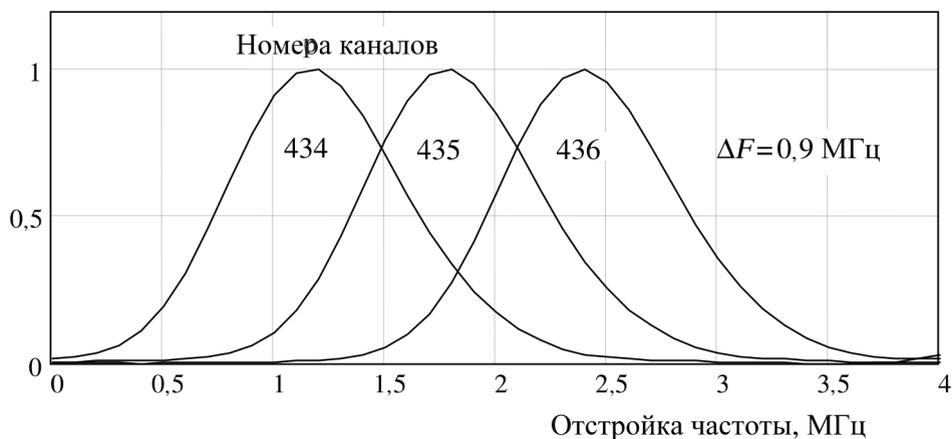


Рис. 3. Интерполированные частотные характеристики трех каналов АОС

Синхронизация системы сбора данных осуществляется импульсами от модулятора антенного блока приемника, запускающими внутренний таймер микропроцессора. На этапе предварительной обработки в сигнальном процессоре производится раздельное накопление спектров сигналов каждого из двух лучей с переключением буферных накопителей в темпе модуляции входного сигнала (синхронное накопление).

Для достижения требуемой флюктуационной чувствительности спектрометра необходимо оценить и компенсировать влияние нестабильности характеристик АОС, проявляющейся при длительном накоплении сигнала. Была рассмотрена возможность обеспечить требуемую точность частотной привязки спектра за счет выбора алгоритма обработки данных при построении частотной градуировки широкополосного АОС и последующей компенсации дрейфов частотной шкалы спектрометра при цифровой обработке спектров [4]. При этом аппаратная функция акустооптического спектроанализатора моделировалась гауссоидой, а для регрессионного анализа данных измерений использовалась функция *genfit* из пакета MathCAD [5]. В результате разработан вариант алгоритма построения текущей частотной градуировки, позволяющий учитывать ее температурные дрейфы в процессе длительных наблюдений путем обработки сигнала стабильного частотного репера, регистрируемого одновременно с исследуемым сигналом. Полученная величина погрешности частотной градуировки спектрометра не превышает 30 кГц в полосе частот 60 МГц вблизи центра исследуемой линии

(142,175 ГГц), что согласуется с ограничениями, накладываемыми реализуемой флюктуационной чувствительностью и максимальной крутизной измеряемой линии.

Оценки долговременной амплитудной стабильности АОС проводились на основании результатов измерения зависимости дисперсии Аллана от времени накопления. Подобная методика применяется для оценки стабильности стандартов частоты и спектрометров, в частности, акустооптических [6]. Для режима работы спектрометра с достаточно высокой частотой модуляции, реализуемого в озонометре, нами была предложена более простая и эффективная методика, предусматривающая анализ зависимости от времени накопления оценки «спектрально-временной дисперсии» получаемых спектральных отсчетов [7]. Смысл ее состоит в том, что часть процесса усреднения по набору временных отсчетов заменяется усреднением по набору спектральных каналов. Для дифференциального сигнала, получаемого при демодуляции, такая замена оказывается вполне обоснованной, а время измерения, необходимое для получения соответствующих оценок, уменьшается в десятки раз. Результаты применения такой процедуры для обработки данных, полученных при измерении выходного шума в 40 спектральных каналах системы в течение двух часов, приведены на рис. 4, где в логарифмическом масштабе показана зависимость от времени накопления вычисляемой дисперсии и аппроксимация, соответствующая поведению оценки дисперсии нормального шума.

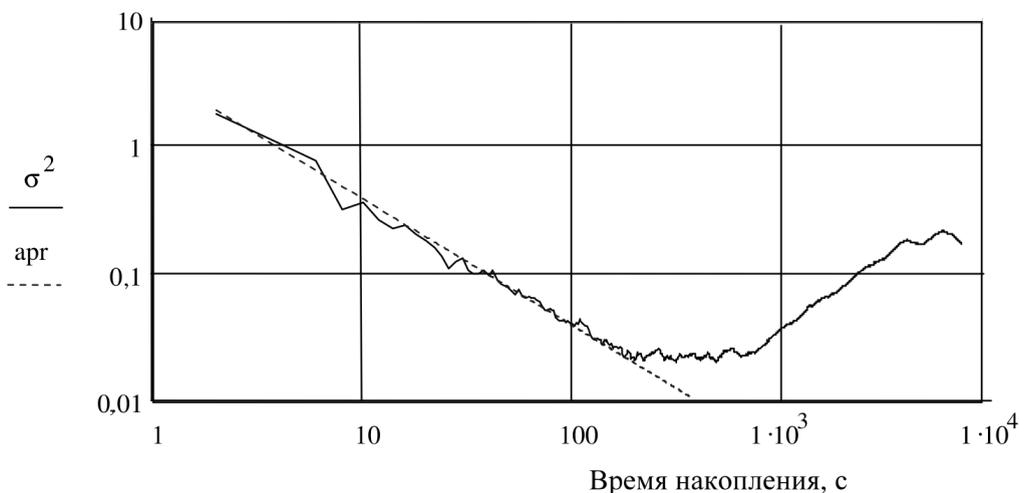


Рис. 4. Зависимость спектрально-временной дисперсии от времени накопления – σ^2

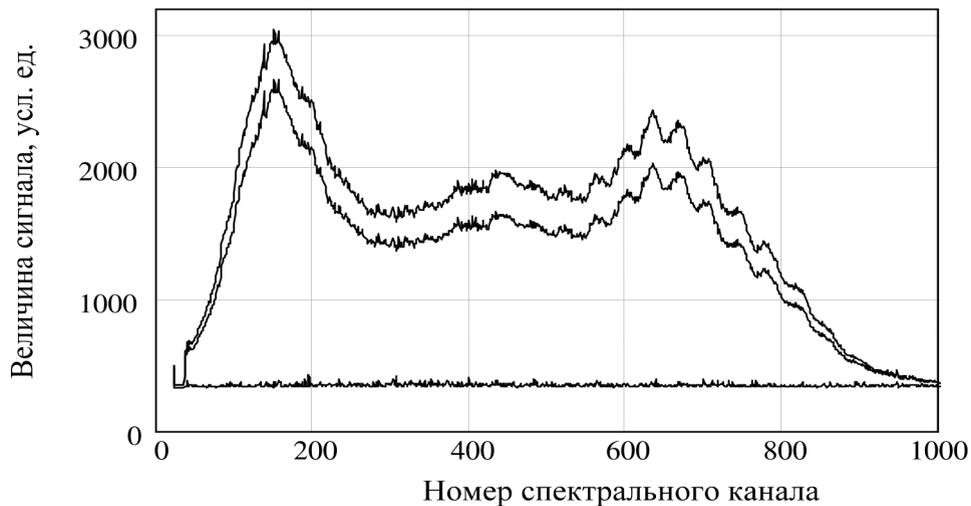


Рис. 5. Сигналы на выходах каналов АОС при теплой (верхняя кривая) и холодной (нижняя кривая) нагрузках на входе приемника

Видно, что определяемый положением минимума дисперсии максимальный временной интервал между калибровками составляет около 200...300 с. При дальнейшем увеличении времени накопления сигнала увеличивается вклад собственного шума спектрометра в суммарный шум радиометра, что ухудшает достижимую флюктуационную чувствительность. С учетом этого при наблюдениях спектров озона выбирается длительность цикла накопления сигнала между последовательными калибровками.

Методика наблюдений и некоторые результаты

Первые испытания комплекса и пробные измерения спектров атмосферного озона проводились в Москве начиная с июня 2001 г. Настройка приемника производилась по величине откликов в каналах АОС на излучение теплой и холодной поглощающих нагрузок, помещавшихся перед входами антенного блока. При этом на мониторе компьютера и на контрольном осциллографе индентифицировались одновременно сигналы с выходов каналов АОС, соответствующие яркостным температурам внешнего излучения $T_0 \approx 300$ К и $T_c = 110$ К (рис. 5). По величине отношения этих откликов (так называемому Y-фактору) для каждого спектрального канала рассчитывалась яркостная температура приемника. Осцилляции на кривых в правой половине рисунка связаны с интерференцией излучения лазера на входном

окне линейки ПЗС. Они исключаются при калибровке приемника и не проявляются на результатах спектральных измерений. На левом склоне кривых в 137-м канале АОС видны также небольшие пики, соответствующие сигналу реперного генератора с частотой 1,52 ГГц.

Последующая обработка массивов данных, записанных в файлы, включала их поэлементное усреднение в течение выбранного интервала накопления и вычисление разностных спектров сигналов от двух лучей, пропорциональных калибровочной и измеряемой разностям температур. После этого рассчитывался спектр яркостной температуры неба, содержащий искомую линию излучения озона. На последующих этапах обработки проводилось суммирование отдельных «единичных» спектров и восстановление вертикального распределения озона по суммарному спектру с лучшим отношением сигнал/шум [8]. На рис. 6 показан пример суммарного спектра излучения озона, полученный 29 июня 2001 г., а на рис. 7 – восстановленное по этому спектру вертикальное распределение озона на высотах 20–60 км (сплошная линия) [9]. Пунктирная линия – модельное вертикальное распределение озона для июня на широте Москвы [10].

Развитием совместных работ ФИАН и СПбГПУ [8, 9, 11, 12] стала разработка нового транспортабельного озонометра миллиметрового диапазона волн с широкополосным акустооптическим спектроанализатором. Этот прибор ново-

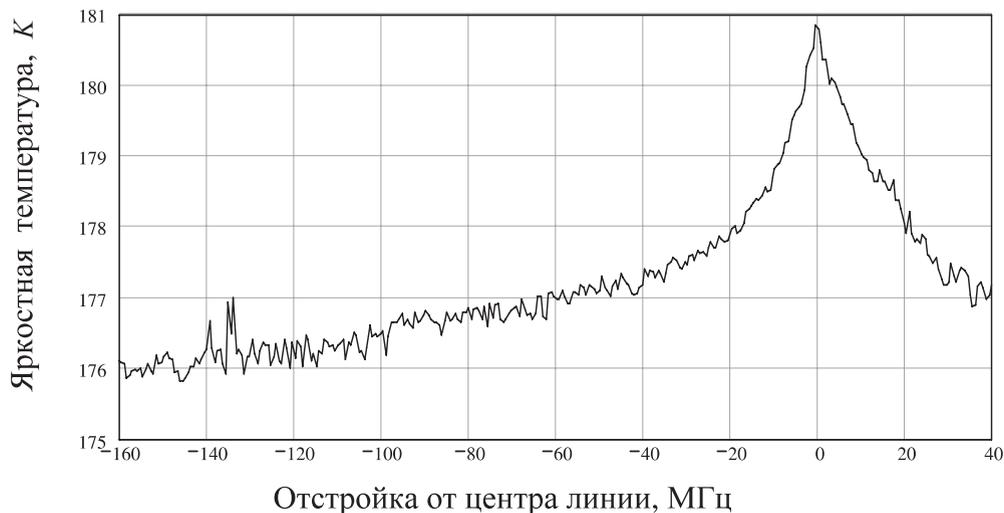


Рис. 6. Пример спектра излучения атмосферного озона. Общее время измерения спектра – 768 с, настройка приемника – двухполосная, ослабление сигнала тропосферой – около 4 дБ

го поколения с улучшенными характеристиками предназначен для регулярного, круглосуточного и мало зависящего от погодных условий наземного мониторинга защитного озонного слоя атмосферы. Новый озонметр включает в себя малошумящий приемник, состоящий из оптического и СВЧ блоков, широкополосный АОС, дополнительный узкополосный фильтровой анализатор спектра (ФАС) и управляющий компьютер со специальным программным обеспечением [13]. Оптический блок супергетеродинного приемника обеспечивает выбор зенитного угла наблюде-

ний, амплитудную модуляцию входного сигнала, преобразование сигнала по частоте в полосу 3,5–4,0 ГГц в волноводном смесителе на диоде Шоттки, подавление зеркальной полосы смесителя, а также калибровку приемника. Гетеродином является твердотельный генератор на диоде Ганна. СВЧ блок приемника обеспечивает дальнейшее преобразование частоты сигнала к полосам частот широкополосного АОС (1,5–2,0 ГГц) и узкополосного фильтрового анализатора спектра (307,4–318,2 МГц), а также стабилизацию частот всех гетеродинов приемника.

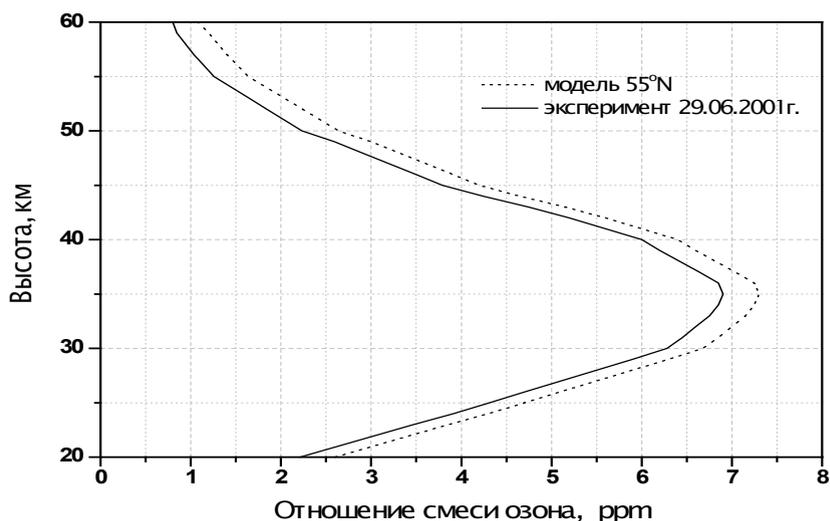


Рис. 7. Вертикальное распределение озона над Москвой, полученное по спектру излучения озона, представленному на рис. 6



Как показало компьютерное моделирование [13], использование в этом озонметре оптоэлектронного спектрометра с полосой около 500 МГц позволит при времени накопления сигнала около 1 ч восстанавливать вертикальное распределение озона (ВРО) в атмосфере на высотах 12–55 км. В настоящее время работы по созданию нового озонметра близки к завершению, в ФИАН ведутся испытания приемника и АОС.

Широкополосный АОС, разработанный в СПбГПУ, может быть использован также в охлаждаемом спектрометре 1,5-миллиметрового диапазона, создаваемом в ФИАН для дистанционного зондирования озоноразрушающих молекул стратосферной окиси хлора на частоте 204,4 ГГц [13], а также других важных малых газовых составля-

ющих атмосферы (озона на частоте 195,4 ГГц, закиси азота на частоте 201,0 ГГц и окиси углерода на частоте 230,5 ГГц).

Результаты измерений характеристик озонметрического комплекса с АОС и проведенные циклы атмосферных наблюдений показали, что широкополосные оптоэлектронные спектрометры, разработанные в коллективе, который создала и многие годы возглавляла профессор Неля Александровна Есепкина, могут успешно применяться для наземного мониторинга вертикального распределения озона в атмосфере средствами радиоспектроскопии миллиметрового диапазона волн и использоваться для получения новых данных о процессах, определяющих содержание малых газовых составляющих в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project [Текст]/Report № 50. –WMO, 2007.
2. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry [Текст]/Ed. M.A.Janssen. –NY: J.Wiley & Sons, 1993.–Ch.7.
3. **Соломонов, С.В.** Спектральные исследования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах [Текст]/С.В. Соломонов, Е.П. Кропоткина, С.Б. Розанов//Монография «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты»; под. ред. Л.Н. Синицы, Е.А. Виноградова.–Томск: Изд. Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004.–С.52–85.
4. **Саенко, И.И.** Особенности применения акустооптоэлектронного процессора в радиометре для дистанционного зондирования атмосферы [Текст]/И.И. Саенко, С.И. Иванов//Тез. докл. конф. Лазеры. Измерения. Информатика. –СПб.–2008.–С. 58-59.
5. [Электронный ресурс] <http://www.exponenta.ru/soft/mathcad/usersguide/>
6. **Lecacheux, A.** [Текст]/A. Lecacheux, C. Rosolen, P. Dierich [et al.]//Int. J. IR and MM Waves.–1993.–Vol. 14.–№ 2.–Р.169–183.
7. **Саенко, И.И.** Повышение точности спектральных измерений в микроволновом озонметрическом комплексе с оптоэлектронным спектрометром [Текст]/И.И. Саенко, С.И. Иванов//Тез. докл. конф. Лазеры. Измерения. Информатика. –СПб, 1-3 июня 2010. –Изд-во Политехн. ун-та, 2010.–С. 57–58.
8. **Esepkina, N.A.** Performance of the microwave radiometer with acousto-optical spectrum analyzer for ozone measurements [Текст]/N.A. Esepkina, S.K. Kruglov, V.N. Leonov, A.N. Lukin, S.B. Rozanov, I.I.Saenko, S.V. Solomonov//Proc. SPIE. –2003. –Vol. 5066. –P. 236–243.
9. **Есепкина, Н.А.** Радиометрический комплекс с акустооптическим анализатором спектра для исследований атмосферного озона на частоте 142 ГГц [Текст]/Н.А. Есепкина, Е.П. Кропоткина, С.К. Круглов, В.Н. Леонов, А.Н. Лукин, С.Б. Розанов, И.И. Саенко, С.В.Соломонов//Успехи сов. радиоэлектрон. –2003. –№ 1. –С. 52–60.
10. **Keating, G.M.** Improved ozone reference models for the COSPAR international reference atmosphere[Текст]/G.M. Keating, L.S. Chiou, N.C. Hsu//Adv. Space Res. –1996. –Vol. 18. № 9/10.–P. 11–58.
11. **Есепкина, Н.А.** Микроволновый радиометрический комплекс с акустооптическим спектроанализатором для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах [Текст]/Н.А. Есепкина, С.К. Круглов, В.Н. Леонов, А.Н. Лукин, С.Б. Розанов, И.И. Саенко, С.В. Соломонов//Тез. докл. Всерос. конф. Лазеры для медицины, экологии и биологии. –СПб, 21–22 ноября 2001.–С.29–30.
12. **Есепкина, Н.А.** Характеристики акустооптического спектрометра для дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых радиоволнах [Текст]/Н.А. Есепкина, С.К. Круглов, С.Б. Розанов, И.И. Саенко, С.В. Соломонов//Письма в ЖТФ.–2002. –Т. 28.–№10.–С. 35–40.
13. **Розанов, С.Б.** Создание радиоспектрометров в 1,5- и 2-миллиметровом диапазонах длин волн для атмосферных исследований с оптимизированными характеристиками [Текст]/ С.Б. Розанов, И.И. Собельман, В.Г. Божков, Н.А. Есепкина, А.Н. Игнатъев, Е.П. Кропоткина, С.К. Круглов [и др.]//Изв. вузов. Сер. Радиофизика. –2005.–Т. 48.–№ 10–11.–С.857–862.

Международная
научная школа
для молодежи



**«Методология и организация инновационной
деятельности в сфере высоких технологий»**

Международная научная школа для молодежи «Методология и организация инновационной деятельности в сфере высоких технологий» приглашает пройти бесплатное обучение 22–27 сентября 2010 года.

Организатор Школы – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Партнеры Школы – Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и Фонд «ТВН».

Цель создания Школы – получение участниками знаний и навыков, необходимых для коммерциализации научно-технических разработок в сфере высоких технологий. Программа школы предусматривает проведение лекций ведущих ученых и специалистов из России, Германии и Финляндии, а также тренинг, на котором участники будут разрабатывать стратегии вывода на рынок новых продуктов на основе научно-технических разработок.

Молодые ученые приобретут навыки презентации инновационных проектов потенциальным партнерам и инвесторам. Участникам школы предоставляется возможность представить презентации своих проектов на III Петербургском международном инновационном форуме, который пройдет в Ленэкспо с 29 сентября по 1 октября 2010 года.

Школа организуется для студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербурга, а также для участников и заявителей программы У.М.Н.И.К. Обучение в школе бесплатное. По результатам работы Школы будет издан сборник тезисов и выступлений. Для участия в работе Школы необходимо зарегистрироваться на сайте www.school.kafedrapik.ru

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АМОСОВ Владимир Владимирович – доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

БАСЫРОВ Александр Геннадьевич – докторант кафедры электронной вычислительной техники Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.
Тел. (812) 347-95-24, e-mail: Alexanderbas@mail.ru

БОЛДЫРЕВ Юрий Яковлевич – заведующий кафедрой математического и программного обеспечения высокопроизводительных вычислений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: boldyrev@phmf.spbstu.ru

БОЛОТАЕВА Индира Ислановна – доцент кафедры теории и автоматизации металлургических процессов и печей Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), кандидат технических наук.

362000, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44. Тел. (8672) 407-345, e-mail: iibolotaeva@mail.ru

БОЛЬШЕВ Александр Константинович – аспирант кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел. (812) 346-44-87

БРЕХОВ Андрей Геннадьевич – доцент кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат военных наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 431-94-57, e-mail: abrehov@yandex.ru

БРЫНЗА Наталья Анатольевна – доцент кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники, кандидат технических наук.

61166, Украина, г. Харьков, пр. Ленина, д. 14.
Факс: (38+057) 702-10-13, e-mail: info@kture.kharkov.ua

БУДЯКОВ Петр Сергеевич – магистрант кафедры информационных систем и радиотехники Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса.

346500, г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-61-30

БУТЕНКО Игорь Всеволодович – ассистент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета, начальник сектора ООО «Деловые консультации, Санкт-Петербург».

197342, Санкт-Петербург, ул. Торжковская, д. 11.
Тел. (812)702-41-69, e-mail: igor_boutenko@mail.ru

ВЕСЕЛОВ Алексей Олегович – аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ВОИНОВ Никита Владимирович – научный сотрудник кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ГАВРИЛОВ Геннадий Андреевич – старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, кандидат физико-математических наук.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. Тел. (812) 292-71-97, e-mail: gga_holo@mail.ru

ГАЛИНИНА Ольга Сергеевна – младший научный сотрудник ООО «Центр речевых технологий», магистр кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

196084, Санкт-Петербург, а/я 515. E-mail: olga.galinina@gmail.com

ГОЛЛАНДЦЕВ Юрий Алексеевич – *заведующий кафедрой интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. (812) 552-61-77, e-mail: gollandzev@ipi/neva.ru

ГОЛОЛОБОВ Леонид Иванович – *старший научный сотрудник Военно-морского института радиоэлектроники имени А.С. Попова, кандидат технических наук, доцент.*

198514, Санкт-Петербург, Петродворец-4, ул. Разводная, д. 15. Тел. (812) 420-22-73, 450-52-05, e-mail: lig01@mail.ru

ГРИЩЕНКО Александр Анатольевич – *аспирант кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат военных наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 431-94-57, e-mail: Lazio80@mail.ru

ДАИШЕВ Марат Шамилевич – *научный сотрудник кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ДАЛИНГЕР Яков Михайлович – *проректор по информатизации и региональному образованию Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, кандидат технических наук*

196210, Санкт-Петербург, ул. Вертолетная, д. 11. Тел. (812) 704-1512, e-mail: iakovdalingerg@gmail.com

ДРОБИНЦЕВ Павел Дмитриевич – *доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ДУБЕНЕЦКИЙ Владислав Алексеевич – *доцент кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. (812) 552-61-77

ДУПЛИНСКИЙ Михаил Александрович – *преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3.

ЕВТИХИЕВ Николай Николаевич – *заведующий кафедрой лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктор физико-математических наук, профессор.*

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. Тел. (495) 324-74-03, e-mail: k1121@mail.ru

ЕФИМОВ Михаил Юрьевич – *аспирант кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета.*

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28. Тел. (812) 428-69-44, e-mail: michael.efimov@bridge-quest.com

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич – *профессор кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ЗЛОКАЗОВ Евгений Юрьевич – *ведущий инженер кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».*

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. Тел. (495) 324-74-03, e-mail: k1121@mail.ru

ИВАНОВ Сергей Иванович – *доцент кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ИПАТОВ Александр Васильевич – *заместитель директора Института прикладной астрономии РАН, доктор технических наук, профессор.*

191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д.10

КАПУСТИН Алексей Игоревич – *научный сотрудник ООО «Центр речевых технологий», аспирант кафедры физики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

196084, Санкт-Петербург, а/я 515. E-mail: kapustinalex@yandex.ru

КЛИМШИН Дмитрий Валерьевич – *начальник технического отдела научно-учебного центра делового сотрудничества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КОВАЛЕВ Михаил Сергеевич – аспирант кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.

196210, Санкт-Петербург, ул. Верголетная, д. 11 (общ).
Тел. (812) 704-1512, e-mail: mikhail.kovalev@gmail.com

КОЗЛОВ Александр Викторович – программист научно-исследовательского департамента ООО «Центр речевых технологий», инженер-математик Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел. (812) 346-44-87, e-mail: kozlov-a@speechpro.com

КОЗЛОВ Алексей Николаевич – заведующий кафедрой информационных систем Пермской государственной сельскохозяйственной академии имени академика Д.Н. Прянишникова, кандидат технических наук, доцент.

614990, г. Пермь, ул. Коммунистическая, д. 23.
Тел. (342)2-103-413, e-mail: kozlov70@rambler.ru

КОЛЧЕВ Алексей Анатольевич – доцент кафедры прикладной математики и информатики Марийского государственного университета, кандидат физико-математических наук.

424001, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1. E-mail: kolchevaa@mail.ru

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович – профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КОТЛЯРОВА Лина Павловна – старший преподаватель кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КОЧКАРОВ Азрет Ахматович – руководитель учебно-научного комплекса «Бизнес-администрирование», кандидат физико-математических наук, доцент Института гуманитарного образования и информационных технологий.

369000, г. Черкесск, ул. Космонавтов, д. 39/29.
Тел. 8(8782) 202-387, e-mail Rasul_Kochkarov@mail.ru

КРУГЛОВ Сергей Константинович – доцент кафедры информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

КРЮЧКОВСКИЙ Виктор Владимирович – профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета, кандидат физико-математических наук.

73008, Украина, г. Херсон, Бериславське ш., д. 24.
Тел. +38(0552) 326909, e-mail: kstu@tlc.kherson.ua

КУЛЕШОВ Игорь Александрович – заместитель начальника научно-исследовательского центра, доцент Военной академии связи имени С.М. Буденного, кандидат военных наук.

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3.

КУРИКОВ Николай Николаевич – аспирант кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КУРОЧКИН Леонид Михайлович – начальник лаборатории автоматизированных систем управления Учебно-методических объединений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-65-21, e-mail: kurl@ya.ru

ЛАВРОВ Александр Петрович – профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ЛИСС Александр Рудольфович – профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», доктор технических наук.

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел. (812) 346-44-87

ЛОХАНОВА Александра Ивановна – научный сотрудник научно-исследовательского департамента ООО «Центр речевых технологий», магистр кафедры вычислительной математики и информатики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

198030, Санкт-Петербург, ул. Коммуны, д. 50.
E-mail: lohanova@speechpro.com

МАЛАХОВ Юрий Анатольевич – преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3.

МАНЖУЛА Владимир Гаврилович – доцент кафедры информационных систем и радиотехники Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, кандидат технических наук.

346500, г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-61-30, e-mail: manjula@sssu.ru

МАРДЫШКИН Вячеслав Владимирович – заведующий лабораторией радиоастрономических приемных устройств Института прикладной астрономии РАН, кандидат технических наук, доцент.

191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10. Тел. (812) 275-11-18, факс: (812) 275-11-19, e-mail: ira@ira.nw.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Георгиевич – старший научный сотрудник лаборатории радиоастрономических приемных устройств Института прикладной астрономии РАН, кандидат технических наук.

191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10. Тел. (812) 275-11-18, факс: (812) 275-11-19, e-mail: ira@ira.nw.ru

МАСЮК Андрей Александрович – аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: mahajrod@rambler.ru

МОЛОДЯКОВ Сергей Александрович – доцент кафедры информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

МУХАНОВ Руслан Салаватович – аспирант кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28. Тел. (812) 428-69-44

МЯГОТИН Антон Владимирович – начальник отдела учебно-инновационной работы и стратегического развития Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.

196210, Санкт-Петербург, ул. Верголетная, д. 11 (общ). Тел. (812) 704-1512, e-mail: anton.myagotin@gmail.com

НАГОРНЫЙ Владимир Степанович – профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88, e-mail: nagorny@jet.hop.stu.neva.ru

НЕДОПЁКИН Александр Евгеньевич – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Марийского государственного университета.

424001, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1. E-mail: agasfer911@yandex.ru

НЕНАШЕВ Александр Васильевич – доцент кафедры радиоэлектроники Сургутского государственного университета Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) – Югры, кандидат технических наук.

628412, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1. Тел. (346-2) 76-31-24, e-mail: navas1@mail.ru

НИКИФОРОВ Игорь Валерьевич – студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ПЕРИСТАЯ Алёна Сергеевна – аспирант кафедры радиоэлектроники Сургутского государственного университета Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО).

628412, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1. Тел. (346-2) 76-31-24, e-mail: alyona359@mail.ru

ПЕТРОВ Алексей Викторович – студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ПЕТРОВ Эдуард Георгиевич – заведующий кафедрой системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор.

61166, Украина, г. Харьков, пр. Ленина, д. 14. Факс: (38+057) 702-10-13, e-mail: info@kture.kharkov.ua

ПРОКОПЕНКО Николай Николаевич – заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, доктор технических наук, профессор.

346500, г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-61-30

ПУГАЧЕВ Павел Владимирович – аспирант кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ПЩЕЛКО Николай Сергеевич – доцент кафедры общей и технической физики Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета), кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 328-82-06, e-mail: nikolsp@mail.ru

РОГОВ Сергей Александрович – профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

РОДИН Владислав Геннадиевич – старший научный сотрудник кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», кандидат физико-математических наук.

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. Тел. (495) 324-74-03, e-mail: k1121@mail.ru

РОЗАНОВ Сергей Борисович – заведующий лабораторией спектроскопии миллиметровых волн ФИАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

119991, ГСП-1 Москва, Ленинский пр., д. 53. Тел. (495) 135-42-64

РОЗОВ Сергей Владимирович – доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

РОМАНОВ Сергей Васильевич – начальник управления стратегического планирования и развития Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

РОСТОВ Николай Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

РУТКОВСКИЙ Александр Леонидович – профессор кафедры теории и автоматизации металлургических процессов и печей Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ), доктор технических наук.

362000, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44. Тел. (8672) 407-345, e-mail: Rutkowski@mail.ru

САЕНКО Игорь Иванович – заведующий центром оптоэлектронных информационных систем кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

САРАДЖИШВИЛИ Сергей Эрикович – доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

САФОНОВ Владимир Олегович – профессор кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета, доктор технических наук.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28. Тел. (812) 428-69-44

СЕРЕБРЯКОВ Александр Игоревич – магистрант кафедры информационных систем и радиотехники Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса.

346500, г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, д. 147. Тел. (8636) 22-61-30

СИМОНЧИК Константин Константинович – научный сотрудник научно-исследовательского департамента ООО «Центр речевых технологий».

196084, Санкт-Петербург, а/я 515. E-mail: simonchik@speechpro.com

СКОРОХОД Владимир Викторович – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

СОЛОМОНОВ Сергей Вячеславович – ведущий научный сотрудник отдела спектроскопии ФИАН, научный руководитель лаборатории спектроскопии миллиметровых волн, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

119991, ГСП-1 Москва, Ленинский пр., д. 53. Тел. (495) 135-42-64

СОТНИКОВА Галина Юрьевна – старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, кандидат физико-математических наук.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. E-mail: gga_holo@mail.ru

СТАРИКОВ Ростислав Сергеевич – доцент кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», кандидат физико-математических наук.

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. Тел. (495) 324-74-03, e-mail: k1121@mail.ru

СТАРИКОВ Сергей Николаевич – доцент кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. Тел. (495) 324-74-03, e-mail: k1121@mail.ru

УСТИНОВ Сергей Михайлович – профессор кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)297-16-00, e-mail: usm50@yandex.ru

УТАКАЕВА Ирина Хайрлыевна – ассистент кафедры математики Карачаево-Черкесской государственной технологической академии.

369000, г. Черкесск, ул. Космонавтов, д. 39/29. Тел. 8(8782) 202-387, e-mail: utakaev@yandex.ru

ФЁДОРОВ Станислав Алексеевич – ассистент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер-исследователь Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШАБРОВ Николай Николаевич – профессор кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШАНИНА Александра Сергеевна – ведущий программист технического отдела научно-учебного центра делового сотрудничества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШПАК Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Марийского государственного университета.

424001, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1. E-mail: dmtrshpk@mail.ru

ШУМАЕВ Владимир Васильевич – доцент кафедры алгебры, геометрии и методики преподавания математики Марийского государственного университета, кандидат физико-математических наук.

424001, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1. E-mail: shvvladimir@mail.ru

ЮСУПОВ Юрий Вадимович – научный сотрудник кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ЮРОШЕВА Татьяна Александровна – доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ).

362000, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44. Тел. (8672) 407-345, e-mail: trini-83@yandex.ru



АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Козлов А.В., Лоханова А.И., Симончик К.К. АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ РЕЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ.

Проведен обзор существующих методов выделения музыкальных фрагментов в речевом сигнале. Предложен новый алгоритм детектирования на основе анализа изменения мощности спектральных максимумов. Качество детектирования музыкальных фрагментов доказано экспериментально с помощью предложенного алгоритма.

ОБРАБОТКА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МУЗЫКИ. СЕГМЕНТАЦИЯ АУДИОСИГНАЛА.

Крючковский В.В., Петров Э.Г., Брынза Н.А. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.

Приведен теоретический анализ и вычислительный эксперимент для сравнения значений интервалов неопределенности и средних значений полезности решения $P(x)$ при различных исходных данных модели.

ФУНКЦИЯ ПОЛЕЗНОСТИ. ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. АДДИТИВНАЯ И ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МОДЕЛИ.

Симончик К.К., Галинина О.С., Капустин А.И. АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕЧЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИК ОСНОВНОГО ТОНА В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИКТОРА.

Предложена модификация алгоритма детектирования речевого сигнала (VAD), основанного на оценке основного тона. VAD исследован как компонент системы распознавания диктора по голосу, проверено его влияние на качество работы системы. Проведено сравнение предлагаемого алгоритма с алгоритмом VAD на основе энергии. Экспериментальные результаты показали существенное улучшение качества работы системы при использовании предлагаемого алгоритма.

ДЕТЕКТОР РЕЧИ. РАСПОЗНАВАНИЕ ДИКТОРА. ВЕРИФИКАЦИЯ. ОСНОВНОЙ ТОН.

Гололобов Л.И. МОДЕЛИ СОВМЕСТИМОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК» И «ТЕХНИКА».

Установлена закономерность и раскрыты свойства совместной обработки и передачи данных операторами и техническими средствами. Разработаны модели совместимости математических методов исследования подсистем «человек» и «техника».

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ. СВОЙСТВА. СОВМЕСТИМОСТЬ. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ.

Кулешов И.А., Малахов Ю.А., Дуплинский М.А. К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ КАНАЛА УТЕЧКИ НАРУШИТЕЛЯ.

Рассмотрен процесс преобразования открытых каналов между участниками информационного обмена в канал с ошибками. Предложено использовать канал между участниками информационного обмена с меньшей вероятностью ошибки, чем канал утечки, используемый нарушителем.

КАНАЛ СВЯЗИ. МОДЕЛЬ. КАНАЛ УТЕЧКИ. ЛЕГАЛЬНЫЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛИ. НАРУШИТЕЛИ.

Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Манжула В.Г. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ПРИ НИЗКОМНОЙ НАГРУЗКЕ.

Рассмотрен принцип взаимной компенсации импедансов, позволяющий обеспечить построение дифференциальных усилителей с повышенным коэффициентом усиления без увеличения числа последовательно соединенных транзисторных каскадов.

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ. ИМПЕДАНС. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Недопёкин А.Е., Колчев А.А., Шумаев В.В. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛЧМ СИГНАЛА.

Проведен анализ влияния фонового шума и частотно-временной дисперсии ионосферного радиоканала на точность определения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала. Получены аналитические выражения для оценки разрешающей способности. Приведены результаты численного моделирования и установлены экстремальные значения параметров зондирования.

ИОНОЗОНД. ИОНОСФЕРНЫЙ РАДИОКАНАЛ. ДОПЛЕРОВСКОЕ СМЕЩЕНИЕ. ФАЗА. ФОНОВЫЙ ШУМ. ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ ДИСПЕРСИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Колчев А.А., Шпак Д.Г. КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА С ЛЧМ.

Рассмотрена методика обработки широкополосного КВ радиосигнала с ЛЧМ, позволяющая построить передаточную функцию многолучевого ионосферного радиоканала с диффузной многолучевостью. Описана схема разделения сигнала и шума на выходе приемника, что дает возможность оценки спектральной плотности шума в широкой полосе. Приведена методика квазиоптимальной фильтрации ЛЧМ сигнала и экспериментально показана ее эффективность.

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА. СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ. ДИФFUЗНАЯ МНОГОЛУЧЕВОСТЬ.

Ростов Н.В. СИНТЕЗ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА.

Рассмотрены процедуры синтеза цифровых последовательных регуляторов высокого порядка методом размещения полюсов. Изложена методика итерационной параметрической оптимизации таких регуляторов в пространстве полюсов по интегральным критериям с совмещенным синтезом и анализом динамики замкнутой системы. Приведены примеры синтеза и оптимизации.

ЦИФРОВЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. МЕТОД РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСОВ. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ.

Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Манжула В.Г. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ SiGe-ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С НИЗКОВОЛЬТНЫМ ПИТАНИЕМ.

Рассмотрены схемотехнические решения, позволяющие повысить в 8–20 раз коэффициент усиления по напряжению при использовании низкоомных резисторов в цепи коллекторной нагрузки входного каскада, расширить частотный диапазон и уменьшить э.д.с. смещения нуля.

SiGe-ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ. НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ.

Рогов С.А., Розов С.В., Скороход В.В. УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ.

Рассмотрена работа акустооптического анализатора спектра с системой АРУ для обработки импульсных сигналов в присутствии помех. Приведены результаты экспериментальных исследований анализатора спектра с АРУ при обработке сигналов в присутствии помех.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН. АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ. АКУСТООПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА. ИМПУЛЬСНЫЙ СИГНАЛ.

Голландцев Ю.А., Дубенецкий В.А. ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПОИСКА ПАРТНЕРОВ И ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ КЛАССА ERP.

Рассмотрены особенности организации проектирования и производства наукоемкой продукции на основе кооперации. Предложены отдельные проектные решения по информационной поддержке процессов управления поставщиками материалов и комплектующих изделий на основе применения инструментальных средств систем класса ERP (Enterprise Resource Planning). Изучено использование виртуальных предприятий для организации кооперации. Описаны особенности построения партнерских взаимоотношений между поставщиком и потребителем, механизм формирования, сбора и обработки анкет для поиска потенциальных исполнителей заказа.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЯ. СИСТЕМЫ КЛАССА ERP. АНКЕТЫ ПОИСКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.



Брехов А.Г., Грищенко А.А. АСПЕКТЫ ПОНЯТИЙНОГО АППАРАТА ТЕОРИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИКОЙ.

Предложены группы понятийного аппарата теории систем управления логистикой, отраженные в четырех типах системных представлений. Рассмотрены понятия, характеризующие систему управления логистикой как структуру деятельного акта; как множество наблюдаемых и неделимых величин; как единое целое; как совокупность подсистем, связанных иерархически.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИКОЙ. МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ И МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ. ПРОЦЕССНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ. ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ.

Ковалев М.С., Далингер Я.М., Мяготин А.В. ФОРМАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПИРАМИДАЛЬНОЙ СОРТИРОВКИ НА ЯЗЫКЕ СИ-0.

Представлена формальная верификация программного кода выполненного на языке Си-0 алгоритма пирамидальной сортировки для массива произвольного типа данных. Основные этапы включают разработку спецификации алгоритма, написание программного кода сортировки, перевод текста программы в среду формальной верификации Isabelle/HOL и выполнение доказательств, устанавливающих соответствие формальной спецификации алгоритма и его реализации.

ФОРМАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ. ПИРАМИДАЛЬНАЯ СОРТИРОВКА. ПРОГРАММНЫЙ КОД.

Бутенко И.В., Устинов С.М. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕПОЗИТОРИЯ МЕТАДАННЫХ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.

Рассмотрена методика построения репозитория метаданных уже разработанной системы, включающая построение модели хранения объектов, их классификации, построение базы данных метасистемы, загрузку метаданных, а также организационные мероприятия, облегчающие задачу построения метасистемы.

МЕТАДАННЫЕ. МЕТАСИСТЕМА. БАЗА ДАННЫХ. КЛАССИФИКАТОРЫ. СУБД. РЕПОЗИТОРИЙ.

Болдырев Ю.Я. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СОВРЕМЕННОЕ ВОПЛОЩЕНИЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА В НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

Рассмотрены концептуальные проблемы роли и места суперкомпьютерных технологий в современном высокотехнологичном производстве. Изучены вопросы их роли в образовательной среде и научной деятельности вуза.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ.

Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В., Шанина А.С. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.

С использованием современных наукоемких технологий математического моделирования были решены задачи в областях аэродинамики зданий и механики грунтов при проектировании уникальных лыжных трамплинов высотой 140 и 106 м. Также была решена задача оптимизации большепролетных металлических конструкций при проектировании металлического купола диаметром 127 м.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. АЭРОДИНАМИКА ЗДАНИЙ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ. ОПТИМИЗАЦИЯ. БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ. ЛЫЖНЫЕ ТРАМПЛИНЫ. СПОРТИВНЫЕ СООРУЖЕНИЯ.

Ненашев А.В., Перистая А.С. МЕТОД АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ.

Предложен метод анализа и моделирования нелинейных устройств, при котором нелинейные элементы заменяются источниками тока или напряжения, согласно теореме компенсации. Решение находится методом последовательных приближений. Рассмотрение ведется на примере широкополосного преобразователя частоты на диодах.

НЕЛИНЕЙНЫЕ УСТРОЙСТВА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРЕМА КОМПЕНСАЦИИ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.

Жарковский А.А., Куриков Н.Н., Пугачев П.В., Шабров Н.Н. КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ.

Рассмотрена оценка возможности расчета течения, потерь и прогнозирования характеристик консольных центробежных насосов со спиральным отводом на основе расчета течения вязкой жидкости. Отдельное внимание уделено перспективным технологиям анализа и визуализации результатов моделирования в системах виртуальной реальности.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС. ВЯЗКАЯ ЖИДКОСТЬ. ТЕЧЕНИЕ. ПОТЕРИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ. ИНДУЦИРОВАННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ.

Нагорный В.С., Пщелко Н.С. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ПРИ ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНОМ ФОРМИРОВАНИИ.

Разработаны математические модели и основы расчета электрического сопротивления наноструктурированных металлом тонких пленок при электрокаплетруйном формировании.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. НАНОСТРУКТУРИРОВАННАЯ ПЛЕНКА. РАСЧЕТ.

Козлов А.Н. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ШТЫРЯ ОТКРЫТОГО ШТЕПСЕЛЬНОГО РАЗЪЕМА.

Предложено применение положений теории фазированных антенных решеток для расчета диаграммы направленности штыря открытого штепсельного разъема. Математическая модель расчета диаграммы направленности может быть использована для оценки деградационного воздействия СВЧ излучения на экранированную радиоэлектронную аппаратуру через разъем. Приведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ. СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ. ШТЕПСЕЛЬНЫЙ РАЗЪЕМ.

Басыров А.Г. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.

Рассмотрена проблема организации энергосберегающих вычислительных процессов в специализированных вычислительных системах. Изложены концептуальные направления повышения энергоэффективности параллельных вычислительных систем.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС.

Утакаева И.Х., Кочкаров А.А. К ВОПРОСУ ОБ АЛГОРИТМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА.

Рассмотрена задача распознавания предфрактального графа с двумя полными затравками. Произведена математическая постановка, разработан эффективный алгоритм распознавания исследуемого предфрактального графа.

ПРЕДФРАКТАЛЬНЫЙ ГРАФ. ЗАТРАВКА. РАСПОЗНАВАНИЕ. АЛГОРИТМ.

Рутковский А.Л., Болотаева И.И., Юрошева Т.А. АЛГОРИТМ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА ЦИНКА.

На основе результатов исследований промышленного процесса разработана модель и алгоритм модифицированного симплексного поиска для оптимизации процесса электролиза цинка. Это позволило определить максимальное значение извлечения цинка при допустимом диапазоне изменения концентрации кобальта, марганца, свинца и цинка.

АЛГОРИТМ СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. ЭЛЕКТРОЛИЗ.

Курочкин Л.М. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА.

Рассмотрен подход к построению распределенной информационной системы поддержки конструкторских и технологических решений. Изучены вопросы формального описания технологических возможностей предприятий приборостроения и описание алгоритма поиска исполнителей заказа.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. КООПЕРАЦИЯ. ПОИСК ПОДРЯДЧИКОВ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ.

Масюк А.А., Сараджишвили С.Э. КОНТЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДОСТУПОМ К РЕСУРСАМ СЕТИ ИНТЕРНЕТ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ.

Статья посвящена исследованию методов фильтрации и управления доступом к ресурсам сети Интернет и созданию системы контентной фильтрации, которая должна предоставлять механизм распределения прав доступа к сетевым ресурсам, основанный на централизованной базе данных категоризированных Интернет-ресурсов и списках ключевых слов.

КОНТЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ. ФИЛЬТРАЦИЯ ПО КЛЮЧЕВЫМ СЛОВАМ. ДИНАМИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ. URL-ФИЛЬТРАЦИЯ. УПРАВЛЯЕМЫЙ ДОСТУП. ПОЛИТИКА ФИЛЬТРАЦИИ. КАТЕГОРИЗАЦИЯ ДАННЫХ. СТАТИСТИКА ПОСЕЩЕНИЙ САЙТОВ.



Ефимов М.Ю. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВ КОМПИЛЯТОРА C# С ПОМОЩЬЮ MICROSOFT PHOENIX.

Рассмотрены проблемы создания компилятора для .NET совместимого языка C#. Изложены основные приемы оптимизации целевого кода на языке MSIL и их влияние на скорость выполнения программы.

ОПТИМИЗАЦИЯ. КОМПИЛЯТОР. MICROSOFT PHOENIX. C#. MSIL.

Воинов Н.В., Котляров В.П. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭВРИСТИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЕВ.

Описан метод эвристик, обеспечивающий многократное сокращение временных затрат по генерации тестовых сценариев из формальной модели. Представлен подход по декомпозиции крупных моделей на структурные компоненты с целью проведения их независимого анализа и последующей интеграции результатов.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ТЕСТОВЫЙ НАБОР. MSC ДИАГРАММЫ. ДЕКОМПОЗИЦИЯ МОДЕЛИ. ЭВРИСТИКИ.

Муханов Р.С., Сафонов В.О. РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ASPECT.NET ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ВЕРСИИ .NET.

Рассмотрены существующие подходы к разработке программного обеспечения (ПО) с использованием методологии аспектно-ориентированного программирования (АОП). Описана реализация и практическое применение системы Aspect.NET для академической версии .NET – платформы SSCLI/Rotor.

АСПЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ (АОП). АСПЕКТ. МЕТОДОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ. СКВОЗНАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ.

Веселов А.О., Котляров В.П. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ В ОБЛАСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.

Представлен интегрированный подход к автоматизации тестирования телекоммуникационных проектов наряду с автоматической проверкой на соответствие стандартам. В основе предлагаемой идеи – комбинирование верификации и автоматизации тестирования с целью повышения качества программного продукта.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ГЕНЕРАЦИЯ КОДА. MSC. TAG. ТЕСТИРОВАНИЕ СООТВЕТСТВИЯ СТАНДАРТУ.

Дробинцев П.Д., Даишев М.Ш., Котляров В.П. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ECLIPSE.

Предложен прототип интегрированной среды автоматизации тестирования на основе технологии Eclipse. Рассмотрены основные недостатки существующих инструментальных средств, проведен их анализ. Предложено на его основе создать новое инструментальное средство, позволяющее сократить затраты на настройку тестового окружения и адаптацию тестового набора.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ. MSC ДИАГРАММЫ. ECLIPSE. СРЕДА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ.

Никифоров И.В., Петров А.В., Юсупов Ю.В. ГЕНЕРАЦИЯ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПО ТРЕБОВАНИЯМ, ЗАДАННЫМ В НОТАЦИИ USE CASE MAP.

Представлен подход к автоматическому переходу от требований, заданных в нотации UCM, к формальной модели системы. Подход основан на инструменте UCM2BP, осуществляющим генерацию различных выходных форматов из UCM диаграмм.

ТРЕБОВАНИЯ. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ. UCM. MSC.

Даишев М.Ш., Котлярова Л.П. МЕТОДИКА ОТЛАДКИ НА ОСНОВЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРАССЫ ИСПОЛНЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ НА ЯЗЫКЕ JAVA.

Представлен интегрированный подход к отладке приложений, который позволяет сохранять поток управления приложения и восстановления состояния системы для последующего анализа дефектов в окружении разработчика.

МЕТОДИКА ОТЛАДКИ JAVA-ПРИЛОЖЕНИЙ. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ТРАССЫ ИСПОЛНЕНИЯ. ЛОГИРОВАНИЕ. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ.

Большев А.К., Лисс А.Р. ПРОТОТИП ЭВРИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ.

Предложен прототип эвристической системы обнаружения вторжений. Рассмотрен быстрый алгоритм преобразования трафика в набор векторов. Проанализирована возможность сокращения размерности полученного пространства. Проведено исследование прототипа на модельных данных и в реальной сети.

БЕЗОПАСНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ. МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ (МГК). СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ.

Амосов В.В., Фёдоров С.А. ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ АСНИ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР.

Рассмотрены недостатки существующих подходов к разработке математического и программного обеспечения встраиваемых АСНИ и высокоскоростных камер. Предложен новый подход к разработке встраиваемого программного обеспечения для таких устройств, показаны новые качества, которые он придает. Выделен новый класс богатых устройств, приборов и систем, обладающих ими.

ВСТРАИВАЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. АСНИ. СЕТЕВАЯ КАМЕРА. ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ. СКОРОСТНАЯ ВИДЕОСЪЕМКА. БОГАТЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ИНТЕРНЕТА.

Иванов С.И., Ипатов А.В., Круглов С.К., Лавров А.П., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г. ВЫХОДНОЙ МОДУЛЬ РАДИОМЕТРА С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-32.

Представлены результаты разработки выходного модуля радиометра с дистанционным доступом для радиотелескопа РТ-32. Дано описание программного обеспечения модуля и его аппаратного состава. Приведены результаты тестовых испытаний в составе штатного приемного комплекса радиотелескопа.

РАДИОМЕТР. СВЧ ДЕТЕКТОР. РАДИОТЕЛЕСКОП. ДИСТАНЦИОННЫЙ ДОСТУП. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ. ЦИФРОВОЙ СИГНАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР.

Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю. ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ В ТЕХНИКЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.

Представлены результаты работ, выполненных в лаборатории оптоэлектроники и голографии ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, по созданию различных информационно-измерительных систем на основе матричных и линейных ПЗС-фотоприемников, предназначенных для использования в физических экспериментах при исследованиях характеристик быстропротекающих процессов. Приведены технические параметры установок, разработанных для регистрации пространственно-спектральных характеристик мощных импульсных и полупроводниковых лазеров и высокоскоростных систем регистрации, используемых при оптической диагностике плазмы как для записи оптического изображения, так и при исследованиях ее оптических спектров.

ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКИ. СПЕКТРОМЕТРИЯ. ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ. ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ.

Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Злоказов Е.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С. ИНВАРИАНТНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ: ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ В СХЕМАХ КОГЕРЕНТНЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ.

Представлены результаты исследований по реализации инвариантных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схемах когерентных дифракционных корреляторов изображений.

РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОРРЕЛЯТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ. ИНВАРИАНТНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ФИЛЬТР. КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННАЯ ГОЛОГРАММА.

Лавров А.П., Молодяков С.А., Саенко И.И. АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ.

Рассмотрены разработанные оптоэлектронные устройства на основе акустооптических фурье-процессоров и многоэлементных ПЗС-фотоприемников применительно к задачам обработки сигналов в радиоастрономических приемных комплексах. Представлены некоторые результаты использования таких устройств для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров и измерения их поляризационных характеристик и для формирования радиоизображения Солнца.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИК. ДИСПЕРСИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА.

Саенко И.И., Круглов С.К., Розанов С.Б., Соломонов С.В. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ.

Рассмотрена проблема создания широкополосной оптоэлектронной спектрометрической системы и методика ее применения в радиометрическом комплексе для наземного микроволнового мониторинга атмосферного озона.

АТМОСФЕРНЫЙ ОЗОН. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. РАДИОСПЕКТРОМЕТРИЯ. МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ. АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР.



ANNOTATION

KEYWORDS

Kozlov A.V., Lokhanova A.I., Simonchik K.K. MUSIC DETECTION ALGORITHM FOR SPEECH PROCESSING.

A review of the existing classification and separation algorithms is presented. A new algorithm based on spectral peak's power analysis is proposed. Quality of music detection with the new algorithm was proved experimentally.

SPEECH PROCESSING. SPEECH/MUSIC DISCRIMINATION. AUDIO SEGMENTATION.

Kruchkovsky V.V., Petrov E.G., Brynza N.A. INFORMATIONAL PREFERENCE ON STATIC FORM OF PRESENTING OUTGOING DATA UNDER THE CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY.

A theoretical analysis and calculable experiment is presented for comparison of values of intervals of uncertainty and average values of utility of decision $R(x)$ at different basic data of model.

UTILITY FUNCTION. INTERVAL DESCRIPTIONS. MODELS: ADDITIVE, POLYNOMIAL.

Simonchik K.K., Galinina O.S., Kapustin A.I. VOICE ACTIVITY DETECTOR BASED ON PITCH STATISTICS FOR SPEAKER RECOGNITION.

A modification of the voice activity detection (VAD) based on pitch statistics is proposed for improving speaker recognition performance. Comparison of two approaches for the VAD choice for phonogram preprocessing is presented. The first approach is a modification of pitch statistics VAD, the second one represents the simple energy-based scheme. A quantitative measurement of verification system quality is also presented. The experimental results show that the proposed VAD essentially improves the performance of the speaker recognition systems.

VOICE ACTIVITY DETECTOR. VAD. SPEAKER RECOGNITION. PITCH STATISTICS.

Gololobov L.I. THE COMPATIBILITY MODELS OF MATHEMATICAL RESEARCH METHODS OF SUBSYSTEMS "PERSON" AND "TECHNICS".

Law is established and is discovered properties, technical means of joint processing and data transmission by operators are opened. The compatibility models of mathematical research methods of subsystems "person" and "technics" are developed.

LAW. PROPERTIES. COMPATIBILITY. MODELS AND METHODS.

Kuleshov I.A., Malahov J.A., Duplinskij M.A. FORMATION OF THE CHANNEL OF OUTFLOW OF THE INFRINGER.

In clause process of transformation of the open channels between participants of an information exchange in the channel with mistakes is investigated. Thus it is offered to use the channel between participants of an information exchange with smaller probability of a mistake, than the channel of outflow used by the infringer.

LIAISON CHANNEL. MODEL. CHANNEL OF OUTFLOW. LEGAL USERS. INFRINGERS.

Prokopenko N.N., Serebrjakov A.I., Manzhula V.G. FEATURES OF DESIGNING OF DIFFERENTIAL AMPLIFIERS WITH THE RAISED FACTOR OF STRENGTHENING AT LOW LOADING.

In article the principle of mutual indemnification of the impedances is considered, allowing to provide construction of differential amplifiers with the raised factor of strengthening without increase in number of consistently connected transistor cascades.

THE OPERATIONAL AMPLIFIER. PRESSURE OF DISPLACEMENT. MODELLING. IMPEDANCE.

Nedopekin A.E., Kolchev A.A., Shumaev V.V. INACCURACY OF DOPPLER SHIFT DETERMINATION BY MEANS CONTINUOUS AMPLITUDE-MODULATED CHIRP SIGNAL.

It is made analysis of the action of the time-and-frequency dispersion of ionosphere radio link and background noise on accuracy of the Doppler shift determination by means continuous amplitude-modulated chirp signal. Analytical expressions are obtained for estimation of resolution. It is presented results of numerical simulation and is ascertained extreme values of parameters.

IONOSOND. IONOSPHERIC CHANNEL. DOPPLER SHIFT. PHASE. BACKGROUND NOISE. TIME-AND-FREQUENCY DISPERSION. MODELLING.

Kolchev A.A., Shpak D.G. QUASIOPTIMUM OF PROCESSING BROADBAND HF LFM SIGNALS.

It is considered technique of processing broadband HF LFM signals which allowing constructing transfer function radio channel with multipath effect diffusion. The scheme of a signal and noise is described on a receiver exit that gives the chance estimations of spectral density of noise in a wide strip. It is presented technique of quasioptimum filtration LFM signal and efficiency is experimentally shown.

OPTIMUM PROCESSING. COORDINATED FILTRATION. TRANSFER FUNCTION. FREQUENCY DISPERSION. MULTIPATH EFFECT DIFFUSION.

Rostov N.V. SYNTHESIS AND COMPUTER-AIDED OPTIMIZATION OF HIGH ORDER DIGITAL CASCADE CONTROLLERS.

The main procedures of digital cascade controller synthesis by the pole placement technique are discussed. The methods of the controller computer-aided optimization by means of iterative methods are considered. Some examples are presented to solve optimization problems combined with synthesis using integral criterion.

DIGITAL CASCADE CONTROLLERS. ALGEBRAIC SYNTHESIS. POLE PLACEMENT TECHNIQUE. COMPUTER-AIDED OPTIMIZATION. INTEGRAL CRITERION.

Prokopenko N.N., Manzhula V.G., Budjakov P.S. METHODS OF INCREASE OF FACTOR OF STRENGTHENING SiGe-OPERATIONAL AMPLIFIERS WITH LOW VOLTAGE POWER SUPPLUER.

In article are considered the decisions, allowing to raise at 8-20 time voltage amplification factor at use low resistors in a chain of collector loading of the entrance cascade, to expand a frequency range and to reduce pressure of displacement.

SiGe-OPERATIONAL AMPLIFIER. PRESSURE OF DISPLACEMENT. MODELLING.

Rogov S.A., Rozov S.V., Skorokhod V.V. INCREASE IN DYNAMIC RANGE OF THE ACOUSTO-OPTICAL SPECTRUM ANALYZER BY MEANS OF AUTOMATIC GAIN CONTROL.

Article describes work of the acousto-optical spectrum analyzer with automatic gain control for processing of pulse signals with noise. Results of experimental researches of the acousto-optical spectrum analyzer with automatic gain control for processing of pulse signals with noise are described.

DYNAMIC RANGE. AUTOMATIC GAIN CONTROL. ACOUSTO-OPTICAL SPECTRUM ANALYZER. PULSE SIGNAL.

Gollandzev Y.A., Dubeneckii V.A. INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR SEARCHING PARTNERS AND PROJECTS USING ERP CLASS SYSTEMS' TOOLS.

In article design features and cooperation-based organization of high technology production features are considered, separate design decisions for materials' and componentries' suppliers' control processes' information support using ERP (Enterprise Resource Planning) class systems' tools are offered. Virtual enterprises are offered to use for managing cooperation, supplier's and consumer's partner relations' building features are considered, forming, collection and processing mechanism for potential order executors' search questionnaires is described.

PRODUCT LIFECYCLE. ERP CLASS SYSTEMS. POTENTIAL EXECUTORS' SEARCH QUESTIONNAIRES.



Brehov A.G., Grishchenko A.A. ASPECTS OF THE CONCEPTUAL DEVICE OF THE THEORY OF CONTROL SYSTEMS OF LOGISTICS.

In article groups of the conceptual device of the theory of control systems are offered by logistics which are reflected in four types of system representations. The concepts characterising a control system by logistics as structure of the active certificate are considered; as set of observable and indivisible sizes; as a unit; as set of the subsystems connected hierarchically.

CONTROL SYSTEM OF LOGISTICS. MICROSCOPIC REPRESENTATION OF SYSTEM. MACROSCOPICAL REPRESENTATION OF SYSTEM. PROCESS REPRESENTATION OF SYSTEM. HIERARCHICAL REPRESENTATION OF SYSTEM. KINDS OF STRUCTURES OF CONTROL SYSTEMS. CLASSIFICATION OF SYSTEMS. HIERARCHY OF CONTROL SYSTEMS.

Kovalev M.S., Dalinger I.M., Myagotin A.V. FORMAL VERIFICATION FOR A C0 IMPLEMENTATION OF THE HEAPSORT ALGORITHM.

In this article we report on formal software verification for the C0 implementation of the heapsort algorithm for an array of an arbitrary data type. The working steps include the development of an algorithm specification, writing a program code, code translation into the Isabelle/HOL environment, performing a correctness proof showing equivalence between the program implementation and its specification.

FORMAL VERIFICATION. HEAPSORT ALGORITHM. PROGRAMM CODE.

Butenko I.V., Ustinov S.M. THE METHOD TO DESIGN OF METADATA REPOSITORY FOR EXISTING SYSTEM.

In this article it is considered the method of design of Metadata repository for existing System, building object storage model, object classifications model, metasytem database design, loading metadata and manage actions simplifying design of metasytem.

METADATA. METASYSTEM. DATA BASE. CLASSIFIER. DBMS. REPOSITORY.

Boldyrev Y.Y. SUPERCOMPUTER TECHNOLOGY AS THE MODERN REALIZATION of MULTIDISCIPLINARY APPROACH in EDUCATION and SCIENTIFIC ACTIVITY.

This article contains of common questions of the supercomputer technology and its applications. The industrial, educational and scientifically problems of application of the supercomputer technology are discussed.

SUPERCOMPUTER TECHNOLOGY. MACHMATICAL SIMULATION, MULTIDISCIPLINARY PROBLEMS, MULTIPROCESSOR BUNDLED SOFTWARE.

Boldyrev U.I., Klimshin D.V., Romanov S.V., Shanina A.S. MODERN TECHNOLOGIES OF MATHEMATICAL SIMULATION FOR ENGINEERING ANALYSIS AND CIVIL DESIGN.

Modern technologies of mathematical simulation have been applied for solving of interdisciplinary problems of computational fluid dynamics of civil constructions and soil mechanics for ski jumps 140 and 106 meters high. The problems of analysis and optimization for large span steel dome (127 meters diameter) were solved.

MATHEMATICAL SIMULATION. FINITE ELEMENT METHOD. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS OF CONSTRUCTIONS. SOIL MECHANICS. OPTIMIZATION. LARGE SPAN STEEL STRUCTURES. SKI JUMPS. SPORTS STRUCTURES.

Nenashev A.V., Peristaya A.S. THE METHOD OF THE ANALYSIS AND MODELLING OF NONLINEAR DEVICES WITH APPLICATION OF THE COMPENSATION THEOREM .

The method of the analysis and modeling of nonlinear devices in which the nonlinear elements are replaced by current or voltage, according to theorem compensation. The solution is the method of successive approximations. Consideration conducts on an example of broadband frequency converter to the diodes.

NONLINEAR DEVICES. MODELING. COMPENSATION THEOREM. SUCCESSIVE APPROXIMATIONS. CONVERTER.

Zharkovskiy A.A., Kurikov N.N., Pugachev P.V., Shabrov N.N. COMPUTER SIMULATION AND VISUALIZATION OF FLUID FLOW IN CENTRIFUGAL PUMPS.

Computer simulation of fluid flow in a centrifugal cradle-mounted pump with helix coupler based on viscous fluid model along with prediction of its characteristics are considered. Special attention paid to modern technologies of analysis and visualization in virtual reality systems.

CENTRIFUGAL PUMP. VISCOUS FLUID. FLOW. LOSSES. COMPUTER SIMULATION. VISUALIZATION. VIRTUAL REALITY. AUGMENTED REALITY.

Nagorniy V.S., Pshchelko N.S. BASES FOR CALCULATION OF NANOSTRUCTURED FILMS RESISTANCE AT ELECTRIC DROPS-JET FORMATION.

Mathematical models and bases for calculation of electric resistance of nanostructured by metal thin films at electric drops-jet formation are developed.

ELECTRIC RESISTANCE. NANOSTRUCTURED FILM. CALCULATION.

Kozlov A.N. MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE DIRECTIVITY DIAGRAM OF THE PIN OF THE OPEN PLUG SOCKET.

Application of positions of the theory of the phased antenna lattices for calculation of the directivity diagram of the pin of an open plug socket is offered. This mathematical model can be used for an estimation destroy influences of microwave on screened radio-electronic equipment through a socket. Comparison of results of calculations with experimental data is resulted.

DIRECTIVITY DIAGRAM. DIRECTIVITY DIAGRAM. PLUG SOCKET.

Basyrov A.G. CONCEPTUAL MODEL OF ENERGY-EFFICIENT COMPUTATIONAL PROCESSES IN SPECIAL-PURPOSE COMPUTER SYSTEMS.

In article the problem of the organization of power saving up computing processes in specialized computing systems is considered. Conceptual directions of increase of power efficiency of parallel computing systems are stated.

COMPUTER SYSTEM. ENERGY SAVINGS. PARALLEL COMPUTATIONAL PROCESS.

Utakaeva I.H., Kochkarov A.A. ALGORITHMS OF RECOGNITION OF PREFRACTAL GRAPHS.

Problems of recognition of various predfractal graphs are considered. Mathematical statement is made; effective algorithms of recognition of investigated predfractal graphs are developed.

PREFRACTAL GRAPH. PRIMING. ALGORITHM.

Rutkowski A.L., Bolotaeva I.I., Yurosheva T.A. MODIFIED SIMPLEX SEARCH ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL OF THE PROCESS PARAMETERS OF ZINC ELECTROLYSIS.

On the basis of industrial process research results a newer modified simplex search model and algorithm are developed for zinc electrolysis optimization. It has allowed to define the maximum value of zinc extraction at an admissible range of concentration change of cobalt, manganese, lead and zinc.

SIMPLEX SEARCH ALGORITHM. PROCESS OPTIMIZATION. MATHEMATICAL PROGRAMMING. ELECTROLYSIS.

Kurochkin L.M. SUBALLOCATED INFORMATION SYSTEM OF INDUSTRY PLANING PROCESS.

The article overviews the approach to development of suballocated information system of engineering and technological solutions support; it studies the questions of formal description of instrument making enterprises technological capacity and depicts the algorithm of order executor search.

INSTRUMENT ENGINEERING. COOPERATION. SEARCH OF CONTRACTORS. TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES. ENTERPRISE INFORMATION SUPPORT.



Masyuk A.A., Saradgishvili S.E. THE CONTENT FILTERING AND MANAGEMENT OF ACCESS TO RESOURCES OF THE INTERNET IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS.

The article covers investigation of filtering mechanisms and management of access to Internet-resources. The main purpose of this investigation is to develop the content-filtering system, which should provide the mechanism of access rights distribution to net-resources based on categorized and centralized data base of Internet-resources and key-words.

CONTENT FILTERING. FILTERING BY KEYWORDS. DYNAMIC FILTERING. URL-FILTERING. MANAGEMENT OF ACCESS. POLICY OF FILTRATION. DATA CATEGORIZATION. STATISTICS OF SITES VISITS.

Efimov M.Y. DEVELOPMENT AND REALIZATION OF C# COMPILER FRONT END USING MICROSOFT PHOENIX.

Problems of C# compiler front end development are considered. Common target code optimization methods are stated. Influence of these methods to overall program speed is analyzed.

OPTIMIZATION. COMPILER. FRONT END. MICROSOFT PHOENIX. C#. MSIL.

Voinov N.V., Kotlyarov V.P. APPLYING THE METHOD OF HEURISTICS FOR THE OPTIMAL SET OF TEST SCENARIOS GENERATION.

The paper presents a method of heuristics that provides a multiple reduction of efforts for generation of test scenarios from formal model. The approach of decomposition of large models in structural components for independent analysis and further integration of results is also described.

OPTIMAL TEST SUITE. MSC. MODEL DECOMPOSITION. HEURISTICS.

Mukhanov R.S., Safonov V.O. DEVELOPMENT AND PRACTICAL APPLICATION OF ASPECT.NET SYSTEM TARGETED AT ACADEMIC .NET FRAMEWORK.

The article describes current used approaches to software engineering using aspect-oriented software development (AOSD) methodology. The paper describes development and practical application of Aspect.NET system targeted at academic .NET framework.

ASPECT-ORIENTED SOFTWARE DEVELOPMENT (AOSD). ASPECT. SOFTWARE ENGINEERING METHODOLOGIES. CROSS-CUTTING CONCERN.

Veselov A.O., Kotlyarov V.P. TESTING AUTOMATION OF PROJECTS IN TELECOMMUNICATION DOMAIN.

The paper presents an integrated approach to testing automation of telecommunication projects along with proposals to automation of conformance testing. The underlying idea is to benefit from combining formal verification and testing automation techniques in order to improve product quality.

TESTING AUTOMATION. TELECOMMUNICATION SYSTEMS. CODE GENERATION. MSC. TAT. CONFORMANCE TESTING.

Drobintsev P.D., Daishev M.S., Kotlyarov V.P. INTEGRATED ENVIRONMENT FOR TESTING AUTOMATION BASED ON ECLIPSE PLATFORM.

Prototype of integrated environment for testing automation is proposed. Modern testing automation systems analyzed and proposal for creation of new tool for customization of testing process described.

TESTING AUTOMATION, MSC DIAGRAMS, ECLIPSE, TOOL FOR TESTING AUTOMATION.

Nikiforov I.V., Petrov A.V., Yusupov Y.V. GENERATION OF FORMAL MODEL OF A SYSTEM FROM REQUIREMENTS SPECIFIED IN USE CASE MAP.

The paper presents an automatic approach for transformation of system requirements in UCM notation into a formal model. The approach is based on UCM2BP tool that provides different output formats from UCM maps.

REQUIREMENTS. AUTOMATIC FORMALIZATION. UCM. MSC.

Daishev M.Sh., Kotlyarova L.P. JAVA-APPLICATIONS DEBUGGING TECHNIQUE ON BASIS OF PLAYBACK APPLICATION'S EXECUTION TRACE.

The paper presents an integrated approach to application debugging, to allow saving program execution control flow then restoring program's states and perform defect analysis within development environment. Method is based on minimization of collected logs and further debugging based on dynamic slicing approach.

DEBUGGING TECHNIQUE. JAVA-APPLICATIONS. REPRODUCING OF EXECUTION TRACE. LOGGING. APPLICATION STATE RESTORE.

Bolshev A.K., Liss A.R. HEURISTIC NETWORK INTRUSION DETECTION SYSTEM PROTOTYPE BASED ON PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS.

Prototype of heuristic intrusion detection system is proposed. Fast traffic to vector space conversion algorithm is reviewed. Model space reduction is analyzed. Developed prototype is being overlaid on model data and real network.

NETWORK SECURITY. PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS. INTRUSION DETECTION SYSTEMS.

Amosov V.V., Fyodorov S.A. NEW APPROACH TO DEVELOPING MATHEMATICAL SUPPORT AND SOFTWARE OF EMBEDDED AUTOMATED RESEARCH SYSTEMS AND HIGH SPEED CAMERAS.

Disadvantages of existing approaches to developing mathematical support and software of embedded automated research systems and high speed cameras are discussed. New approach to developing embedded software for this kind of devices are suggested. New properties are shown that it gives. New class of rich devices, apparatuses and systems with these properties is assigned.

EMBEDDED SOFTWARE. AUTOMATED RESEARCH SYSTEM. IP CAMERA. DATA PROCESSING AND TRANSFER. HIGH SPEED PHOTOGRAPHY. RICH INTERNET APPLICATIONS.

Ivanov S.I., Ipatov A.V., Kruglov S.K., Lavrov A.P., Mardyshkin V.V., Mikhailov A.G. THE BACK-END RADIOMETER MODULE WITH REMOTE ACCESS FOR RADIO TELESCOPE RT-32.

The article presents the results of the development of radiometer output module with remote access for the radio telescope RT-32. Descriptions of module software and its hardware structure are given. Results of module tests in the radio telescope receiving system are also presented.

RADIOMETER. MICROWAVE DETECTOR. RADIO TELESCOPE. REMOTE ACCESS. FIBER-OPTIC LINE. DIGITAL SIGNAL PROCESSOR.

Gavrilov G.A., Sotnikova G.Yu. CCD-DETECTORS IN TECHNOLOGY OF PHYSICAL EXPERIMENTS.

The article presents the results obtained in the laboratory of Optoelectronics and holography Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences to create various information-measuring systems on the basis of matrix and linear CCD for use in physical experiments in studies of the radiation characteristics of fast processes. The technical parameters of the setups developed for the study of spatial and spectral characteristics of pulsed power and semiconductor lasers and high-speed data recorder systems used in optical diagnostics of plasma for recording of optical images, as well as in studies of its optical spectra are specified.

CCD-PHOTODETECTORS. SPECTROMETRY. PULSED LASERS. SEMICONDUCTOR LASERS. OPTICAL PLASMA DIAGNOSTICS.

Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu., Rodin V.G., Starikov R.S. INVARIANT CORRELATION FILTERS WITH LINEAR PHASE COEFFICIENT: VARIANTS OF REALIZATION IN OPTOELECTRONIC IMAGE CORRELATORS.

Realization of invariant correlation image recognition methods in optoelectronic image correlators allows recognition of images in real time conditions. The results of investigation of invariant correlation filter with linear phase coefficient realization in coherent image correlators are presented in the paper.

IMAGE RECOGNITION. OPTOELECTRONIC CORRELATOR. INVARIANT CORRELATION FILTER. SYNTHESIZED HOLOGRAM.



Lavrov A.P., Molodykov S.A., Saenko I.I. ACOUSTO-OPTO-ELECTRONIC DEVICES FOR RADIO ASTRONOMICAL RECEIVERS.

The optoelectronic devices based on the acousto-optic Fourier-processors and multielement CCD photodetectors are examined in view of signal processing problems for radio astronomical backend receivers. Some results of these devices implementation for pulsar's signals compressing and its polarization characteristics determination and for Solar radio image formation are given.

ACOUSTO-OPTICAL PROCESSOR. CCD PHOTODETECTOR ARRAY. DISPERSION OF PULSAR'S RADIO EMISSION. SOLAR RADIO EMISSION.

Saenko I.I., Kruglov S.K., Rozanov S.B., Solomonov S.V. OPTOELECTRONIC SPECTROMETER FOR ATMOSPHERE REMOTE SENSING AT MILLIMETER WAVES.

The problems of wideband optoelectronic spectrometer development and the methods of its implementations for ground based microwave atmospheric ozone monitoring system are considered.

ATMOSPHERIC OZONE. REMOTE SENSING. RADIOSPECTROSCOPY. MILLIMETER WAVES. ACOUSTO-OPTIC PROCESSOR. OPTOELECTRONIC SPECTROMETER.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 4 (103) 2010

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

д.э.н., профессор, канд. техн. наук *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
А.А. Родионова – менеджер по работе с клиентами
М.О. Давыденко – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 26.08.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 33,75. Уч.-изд. л. 33,75. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.