



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

ТОМ 10, № 1
2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

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 ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Philippe Ferrari, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Wolfgang Krautschneider, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Dr. Fa-Long Luo, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Emil Novakov, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Трифонов П.В., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Шкодырев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе серийного периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

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 (812) 552-62-16.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

VOLUME 10, No. 1
2017

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2017

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsyson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Peter V. Trifonov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The journal is indexed by Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, EBSCO, ProQuest, Index Copernicus, VINITI RAS Abstract Journal (Referativnyi Zhurnal), VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Russian Science Citation Index (RSCI) database © Scientific Electronic Library and Math-Net.ru databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Леонов А.В. Экспериментальная оценка возможности использования алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в FANET	7
Петров В.И., Молчанов Д.А., Кучерявый Е.А. Анализ интерференции в беспроводных сетях связи терагерцового диапазона частот	27

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Вэй С., Ольшанский В.М., Волков С.В., Богачев Е.А., Волвенко С.В. Исследование импедансных характеристик углеродных электродов для подземного электротехнического и радиофизического применения	37
--	----

Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

Павлов В.А. Эффективная программная реализация обратного метода Маслова для интуиционистской логики	49
Куручкин Л.М., Чернышев А.С., Куручкин М.А., Домрачев Д.А., Прохоров М.В. Применение суперкомпьютерных технологий для исследования динамики полидисперсных сред	63

Интеллектуальные системы и технологии

Ганин Р.А., Казунин Д.В. Алгоритмы управления динамической 3DOF платформы подвижности	77
--	----

Contents

Telecommunications Systems and Computer Networks

Leonov A.V. <i>The Ant-Colony-Based Routing Algorithm AnthocNet for Solving the Routing Problem in FANET</i>	7
Petrov V.I., Moltchanov D.A., Koucheryavy Ye.A. <i>Interference Analysis in Terahertz Band Wireless Networks</i>	27

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Wei X., Ol'shanskiy V.M., Volkov S.V., Bogachev E.A., Volvenko S.V. <i>Impedance Characteristics of Carbon Electrodes for Underground Electrical and Radiophysical Applications</i>	37
--	----

Software of Computer, Telecommunications and Control Systems

Pavlov V.A. <i>Efficient Implementation of the Inverse Method for First-Order Intuitionistic Logic</i>	49
Kurochkin L.M., Chernyshev A.S., Kurochkin M.A., Domrachev D.A., Prokhorov M.V. <i>Application of Supercomputer Technologies for Studying the Dynamics of Polydisperse Mediums</i>	63

Intellectual Systems and Technologies

Ganin R.A., Kazunin D.V. <i>Control Algorithms for the 3DOF Dynamic Motion Platform</i>	77
--	----

DOI: 10.18721/JCSTCS.10101

УДК 004.7:[004.8:004.23]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ANTHOCNET ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ В FANET

А.В. Леонов

Омский государственный технический университет
г. Омск, Российская Федерация

FANET представляют собой беспроводные самоорганизующиеся сети, состоящие из беспилотных летательных аппаратов. Такие сети характеризуются высокой подвижностью узлов, динамически изменяющейся топологией и движением в 3D-пространстве. Маршрутизация в FANET является чрезвычайно сложной задачей. В статье рассмотрены различные методы организации маршрутизации в FANET. Представлен обзор методов организации интеллектуальной маршрутизации, основанных на муравьином алгоритме. В отличие от существующих исследований впервые экспериментально подтверждена возможность эффективного использования протоколов на базе алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в сетях FANET.

Ключевые слова: одноранговая самоорганизующаяся сеть БПЛА; FANET; беспилотный летательный аппарат; БПЛА; протоколы маршрутизации; роевой интеллект; алгоритм муравьиной колонии; имитационное моделирование сети.

THE ANT-COLONY-BASED ROUTING ALGORITHM ANTHOCNET FOR SOLVING THE ROUTING PROBLEM IN FANET

A.V. Leonov

Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation

FANET (Flying Ad Hoc Network), similar to mobile peer-to-peer networks MANET and vehicular peer-to-peer networks VANET, represents a special type of peer-to-peer ad hoc network based on UAVs. Such a network has the ability to self-organize and adapt and is characterized by a dynamic changing topology. Special routing algorithms developed due to their specific features are need to organize FANET. The article gives a short overview of the existing FANET algorithms, as well as of the algorithms based on the swarm intelligence algorithms such as ant colony optimization. The experimental analysis was conducted, that proved the possibility of efficient application of ant colony optimization algorithm. The analysis was performed with the AntHocNet protocol simulating the behavior of ants in wildlife to solve the routing problems in FANETs.

Keywords: flying Ad Hoc Network; FANET; unmanned aerial vehicle; UAV; routing protocols; swarm intelligence; ant colony optimization; ACO; network simulation.

FANET (Flying Ad Hoc Network) по аналогии с мобильными одноранговыми сетями MANET (Mobile Ad Hoc Network) и автомобильными одноранговыми сетями VANET (Vehicular Ad Hoc Network) представляет собой разновидность сетей VANET, узлами сети которой являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (рис. 1) [1]. Сравнительная характеристика этих типов Ad Hoc сетей представлена в табл. 1 [2]. Сети FANET обеспечивают широкий спектр возможностей для гражданского применения. Организация такого вида связи необходима не только для выполнения задач по обеспечению наблюдения, мониторинга, но и, например, для эффективной координации движения транспортных средств, повышения уровня безопасности (например, в качестве средства для предотвращения столкновений)

и т. д. [3].

FANET характеризуются высокой подвижностью узлов, динамически изменяющейся топологией и движением в 3D-пространстве, что создает множество дополнительных трудностей по организации связи в сети и требует применения специализированных протоколов. Взаимодействие узлов ограничено выделенными частотными ресурсами, энергоемкостью узлов, условиями распространения радиосигнала и т. п. Взаимодействие между узлом-отправителем и узлом-получателем осуществляется случайным образом через цепочку промежуточных узлов. Таким образом, узлы сети не только получают данные, но и выполняют функции маршрутизатора, обеспечивая доставку данных к промежуточным узлам. На рис. 2 схематически представлена сеть FANET.

Таблица 1

Сравнение сетей FANET, VANET и MANET

Критерии	Виды Ad Hoc сетей		
	FANET	VANET	MANET
Мобильность узлов	Высокая	Средняя	Низкая
Модель перемещения сетевых узлов	Обычно заранее определенные, используются специальные модели	Неизменное	Произвольное
Плотность размещения узлов	Низкая	Средняя	Высокая
Изменение топологии	Крайне высокое	Среднее	Медленное
Распространение радиоволн	Высоко над землей, линия визирования (Line of Sight, LoS) доступна в большинстве случаев	Близко к земле, LoS доступна	Очень близко к земле, LoS недоступна
Потребляемая мощность и срок службы сети	Критично для мини БПЛА	Некритично	Использование энергоэффективных протоколов
Вычислительные ресурсы	Высокие	Средние	Ограниченные
Определение местоположения	GPS, AGPS, DGPS, IMU	GPS, AGPS, DGPS	GPS

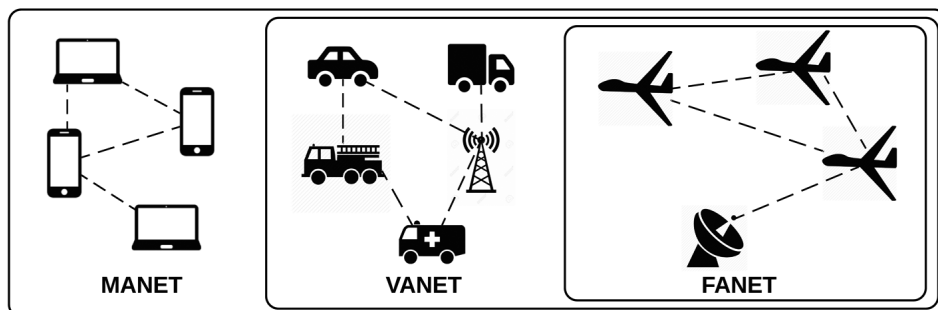


Рис. 1. MANET, VANET и FANET

С учетом особенностей сетей FANET маршрутизация данных между узлом-отправителем, узлом-получателем и транзитными узлами представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

За последние 20 лет разработано несколько модификаций алгоритма AntNet, которые позволяют применить его в различных компьютерных сетях, включая мобильные Ad Hoc сети.

В статье представлен анализ применения муравьиных алгоритмов, полученный по результатам экспериментального имитационного моделирования для решения задачи маршрутизации в сетях FANET.

Классификация протоколов динамической маршрутизации в сети FANET

Алгоритмы маршрутизации применяются для нахождения наилучшего пути при передаче данных от узла-источника к

узлу назначения с максимальной производительностью и минимальными затратами. Кроме того, алгоритмы служат основой для любого протокола маршрутизации.

Выбор протокола маршрутизации FANET является нетривиальной задачей, для решения которой необходимо учесть множество факторов и критериев.

Эти протоколы могут быть разделены на пять основных категорий [2]:

- проактивные;
- реактивные;
- гибридные;
- иерархические;
- протоколы геомаршрутизации.

При изменении топологии сети в проактивных протоколах инициируется широковещательная рассылка сообщений об этих изменениях. При этом в памяти каждого узла хранятся маршруты до каждого из узлов сети. Таким образом, каждый узел

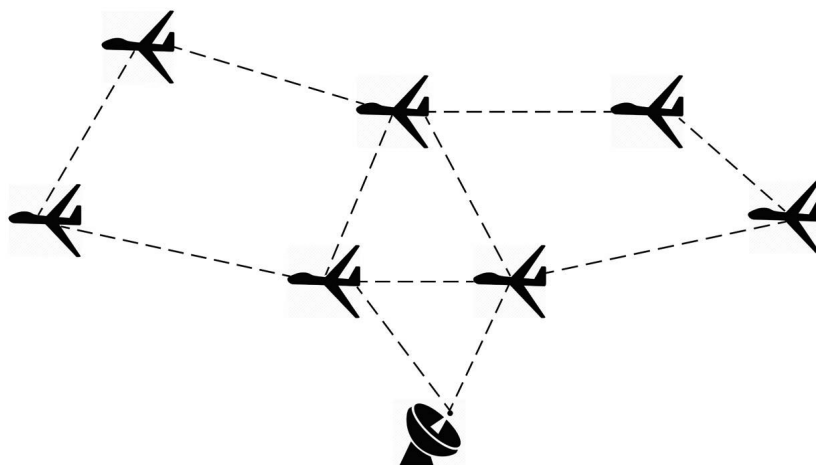


Рис. 2. Самоорганизующаяся сеть на основе БПЛА (FANET)

сети имеет граф связности сети, обеспечивающий решение задачи поиска кратчайшего пути. Проактивными протоколами являются: FSR [4], OLSR [5] и его разновидности (DOLSR [6], M-OLSR [7], P-OLSR [8] или CE-OLSR [9]), DSDV [10] и B.A.T.M.A.N [11], AeroRP [12], MARP/MDP [13], ADS-B [14], BGP-MX [15] и др.

Реактивные протоколы маршрутизации строят маршруты только тогда, когда они необходимы, т. е. непосредственно перед передачей данных. К реактивным протоколам относятся: AODV [16] и его разновидности (AODVSEC [17], Time-slotted on-demand routing [18], MAODV [19]), DSR [20], LMR [21], DYMO [22], OSPF-MDR [23] и др.

Гибридные протоколы представляют собой симбиоз проактивных и реактивных протоколов. Гибридными являются протоколы ZRP [24], SHARP [25], HRPO [26], TORA [27].

В отдельную группу протоколов маршрутизации FANET можно выделить протоколы, использующие данные о местоположении узлов сети. Преимуществом таких протоколов является отсутствие необходимости хранения маршрутной информации на транзитных узлах, а также возможность оптимизации маршрутов благодаря информации о местоположении узлов. К этому семейству принадлежат протоколы GPSR [28], GPMOR [29], USMP [30], MPGR [31], DREAM [32], LAR [33].

Еще одним из решений для маршрутизации в FANET являются иерархические алгоритмы, разработанные для решения проблемы масштабируемости сети. Сеть делится на кластеры (уровни, слои, группы или домены), в каждом кластере выбираются главный узел, шлюзы и внутренние узлы. Один из основных недостатков протоколов этого типа — относительно высокая сложность их реализации и схемы адресации. Примерами иерархических протоколов являются LANMAR [34], DREAM.

Общие положения алгоритма муравьиной колонии

Принципы и архитектуры функционирования биологических систем управления,

обеспечивающие способность животных приспосабливаться и адаптироваться к постоянно меняющимся условиям внешней среды, являются предметом активных исследований в ведущих научных центрах. Среди них особенно активно развиваются методы роевого интеллекта. Понятие роевого интеллекта (Swarm intelligence) введено Херардо Бени и Ван Цзином в 1989 году [35]. Под роевым интеллектом понимают самоорганизующуюся систему, состоящую из множества агентов. Агенты подчиняются простым правилам поведения в окружающей среде. Их простое взаимодействие определяет коллективную адаптацию. Таким образом, на основе «совокупности поведений» простых агентов формируется роевой интеллект. Примерами таких систем могут быть муравьиная колония, пчелиный рой, стая птиц, рыб и т. д. [36, 37].

Муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization — ACO) — это мета-эвристический роевой метод, являющийся одним из эффективных полиномиальных алгоритмов. Применяется для нахождения решений как задачи коммивояжера (Travelling salesman problem — TSP), так и задач комбинаторной оптимизации на графовой модели [38].

Данный алгоритм основывается на поведении муравьев в природе (рис. 3). Различают два вида взаимодействия между особями:

прямое взаимодействие (обмен пищей, визуальный контакт, химический контакт и др.);

косвенное взаимодействие или стигмергия (stigmergy) — две особи взаимодействуют косвенно, когда одна из особей модифицирует окружающую среду, а другая со временем реагирует на это изменение. В природе косвенное взаимодействие осуществляется через феромон (pheromone) — специальный, довольно стойкий секрет, оставляемый как след при перемещении насекомого. Чем больше концентрация феромона на тропе, тем больше муравьев будет по ней двигаться. Со временем феромон испаряется, что позволяет муравьям адаптировать свое поведение под изменения внешней среды [39].

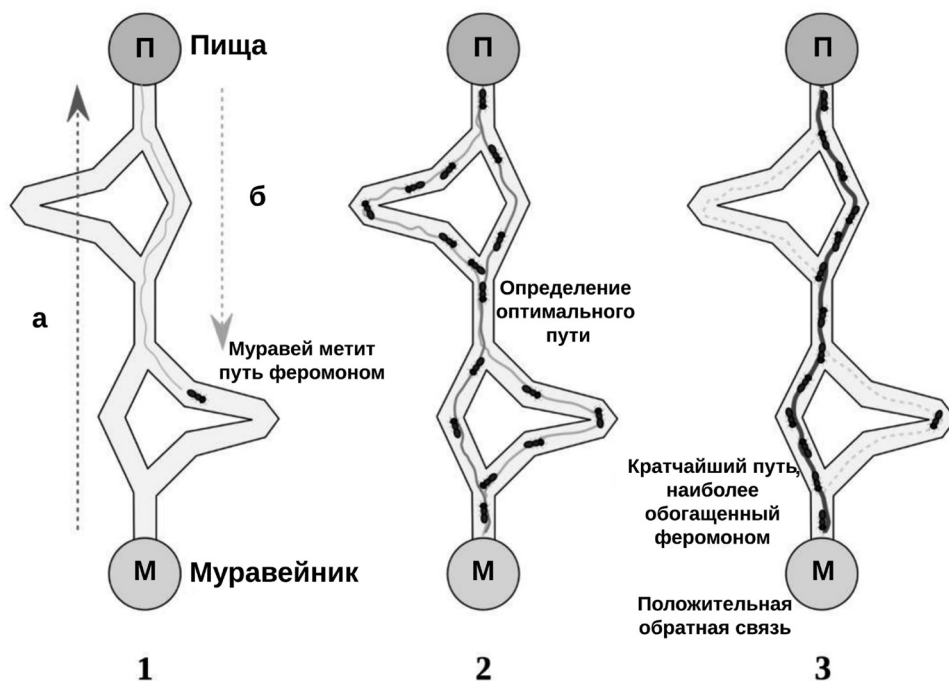


Рис. 3. Принцип работы алгоритма муравьиной колонии

На рис. 4 представлена блок-схема муравьиного алгоритма.

Протоколы маршрутизации на основе алгоритма муравьиной колонии

Подход, заложенный в основу муравьиного алгоритма, продемонстрировал высокую эффективность при решении задач оптимизации распределенных нестационарных систем, допускающих графовую интерпретацию. Примерами может служить нахождение оптимальных маршрутов в телекоммуникационных сетях. Рассмотрим несколько реализаций на основе АСО.

Алгоритм ABC. Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения задачи балансировки нагрузки в телекоммуникационных сетях, стал метод ABC [40]. Сеть представляется в виде графа. Телекоммуникационные станции являются узлами этого графа, а линии связи между ними – его ребрами.

Каждый узел содержит феромонную таблицу, состоящую из $N-1$ колонок и N_k строк, где N – количество узлов сети, N_k – количество узлов, смежных с узлом k . Периодически из каждого узла запуска-

ются муравьи, имеющие случайные узлы-получатели. Муравьи в процессе движения выбирают промежуточные узлы на основе данных из феромонной таблицы. Таким образом, если j – узел-получатель, тогда P_{ij} – это вероятность перехода муравья в соседний узел i . При достижении муравьем очередного промежуточного узла происходит обновление феромонной таблицы этого узла:

$$\begin{cases} P'_{n,src} = \frac{P_{n,src} + \Delta P}{1 + \Delta P} \\ P'_{i,src} = \frac{P_{i,src}}{1 + \Delta P}, i = 1..N_k, i \neq n \end{cases} \quad (1)$$

где n – узел, из которого пришел муравей; src – узел-источник, сгенерировавший муравья; $P_{n,src}$, $P'_{n,src}$ – старое и новое значения ячеек феромонной таблицы; ΔP – увеличение феромона.

При достижении узла назначения муравей уничтожается.

Муравей имеет возраст, равный длине пути, т. е. количеству пройденных узлов. Возраст муравья age влияет на ΔP :

$$\Delta P = \frac{0,08}{age} + 0,005. \quad (2)$$

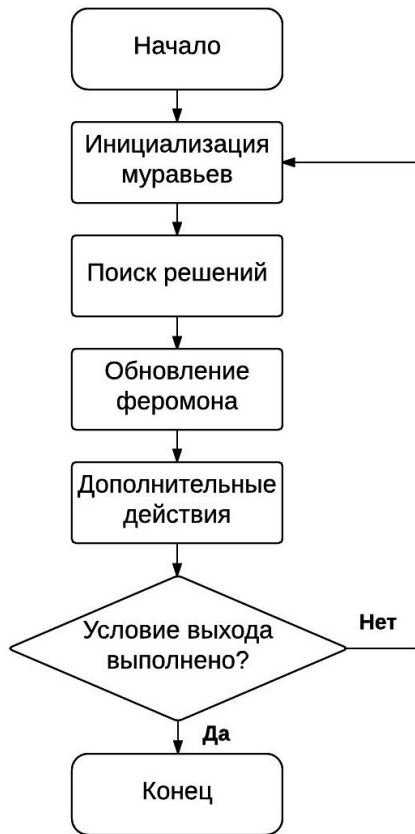


Рис. 4. Блок-схема муравьиного алгоритма АСО алгоритма

На вероятность выбора маршрута в большей степени влияют муравьи, выбирающие наиболее короткий и менее загруженный путь. Это объясняется тем, что эти муравьи быстрее достигают узел назначения и имеют меньший возраст и, следовательно, большее значение ΔP . Таким образом, данные будут идти по маршрутам с наименьшей длиной и степенью загруженности, что позволяет в свою очередь осуществить балансировку нагрузки [41].

Алгоритм AntNet. Алгоритм AntNet [42] предусматривает исследование состояния сети с помощью агентов (муравьев), использующих вероятностные правила выбора маршрута. Рассматриваемый алгоритм позволяет уменьшить вероятность перегрузки сети.

Агентом в AntNet является специальный пакет, который содержит информацию о состоянии пройденных сетевых каналов. Муравьи подразделяются на два вида:

F-муравьи (Forward ants) направляются по сети от узла-источника к узлу назначения, В-муравьи (Backward ants) направляются в обратном направлении. Оба множества агентов имеют одинаковую структуру, но при этом различаются своим поведением в сети. F-муравьи собирают статистику о состоянии сети, они не изменяют таблицу маршрутизации. После достижения агентом узла назначения, на основе F-муравья создается и отправляется В-муравей. В него помещается информация, полученная F-муравьем, после чего F-муравей уничтожается. При прохождении В-муравья по обратному пути узлы сети обновляют свои таблицы маршрутизации. Каждый узел сети осуществляет рассылку F-муравьев с заданной периодичностью Δt .

Каждый узел сети k содержит таблицу маршрутизации T_k и структуру локальной модели трафика M_k . Таблица T_k представляет собой матрицу, в которой каждая строка соответствует узлу сети, а столбец – сетевому интерфейсу узла. Кроме этого, для каждого возможного узла d и для каждого соседнего узла n , таблица T_k хранит вероятность P_{nd} выбора узла n при условии, что d – узел-приемник:

$$\sum_{n \in N_k} P_{nd} = 1, d \in [1, N], \quad (3)$$

$$N_k = \{k \text{ node neighbors}\}.$$

Структура M_k представляет собой массив, определяющий локальную параметрическую модель распределения трафика с точки зрения узла k .

Модель является адаптивной, формируется для каждого узла d с математическим ожиданием μ_d и дисперсией σ_d времени обхода сети агентами и массивом скользящего окна наблюдений W_d . В момент времени, когда В-муравей приходит в узел k , время достижения узла d из узла k $o_{k \rightarrow d}$ помещается в массив W_d .

Для расчета характеристик в алгоритме используется экспоненциальная модель:

$$\mu_d := \mu_d + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d), \quad (4)$$

$$\sigma_d^2 := \sigma_d^2 + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d)^2 - \sigma_d^2, \quad (5)$$

где η – весовой коэффициент.



Массив скользящего окна наблюдений W_d используется для расчета значения W_{bestd} — экспериментальной оценки нижней границы времени достижения узла d из текущего узла k .

$\{T_k\}$ и $\{M_k\}$ образуют локальную память узлов. Модель M_k содержит абсолютные оценки расстояния/времени ко всем узлам, таблица маршрутизации T_k содержит относительные вероятностные оценки полезности перехода для каждой пары «линия связи — узел-получатель».

Муравьи адаптируют свои перемещения к изменяющемуся распределению трафика данных. Узлы-приемники для F-муравья выбираются в зависимости от модели трафика: если $f_{src,d}$ — величина потока передачи данных (в битах или количестве пакетов) от узла s к узлу d , то вероятность создания в узле src F-муравья с узлом-приемником d :

$$p_d = \frac{f_{src,d}}{\sum_{d'=1}^N f_{src,d'}}. \quad (6)$$

В каждом узле k F-муравей выбирает промежуточный узел n из множества тех узлов, которые он еще не посещал. Если агент посещал все узлы, смежные с узлом k , то по всем смежным узлам выбирается узел n с вероятностью:

$$P'_{nd} = \frac{P_{nd} + \alpha \cdot l_n}{1 + \alpha(N_k - 1)}, \quad (7)$$

где P_{nd} — элемент таблицы маршрутизации; α — весовой коэффициент; l_n учитывает длину в битах очереди q_n к линии связи между узлами k и n :

$$l_n = 1 - \frac{q_n}{\sum_{n'=1}^{|N_k|} q_{n'}}. \quad (8)$$

Если в стеке F-муравья обнаружен цикл, т. е. муравей вернулся в уже пройденный узел, то информация об узлах цикла выталкивается из стека.

В-муравьи используют приоритетные очереди, чтобы как можно быстрее распространить между узлами информацию, собранную F-муравьями.

Когда В-муравей достигает узла k из

соседнего узла f , в узле k происходит обновление модели трафика M_k и элементов таблицы маршрутизации T_k , соответствующих узлу-приемнику d . M_k модифицируется по формулам (4), (5).

В таблице T_k увеличиваются вероятности P_{fd} (т. е. вероятности выбора соседнего узла f , если узел-приемник d) и уменьшаются другие вероятности P_{nd} путем нормирования:

$$P_{fd} := P_{fd} + r(1 - P_{fd}), \quad (9)$$

$$P_{nd} := P_{nd} - rP_{nd}, \quad n \in N_k, n \neq f, \quad (10)$$

где $r \in [0, 1]$ — коэффициент стабилизации, аналог феромонов.

Использование в алгоритме вероятностных маршрутных таблиц увеличивает производительность на 30–40 % [41].

Применение протоколов маршрутизации на основе алгоритма муравьиной колонии в самоорганизующихся сетях

Муравьиные оптимизационные алгоритмы отличаются от большинства традиционных алгоритмов маршрутизации. Для решения проблемы маршрутизации в самоорганизующихся сетях исследователями были предложены различные алгоритмы ACO: AntNet, ANTMANET [43], ARA [44], AntNet-RSLR [45], ACODV [46], MRAA [47], AntHocNet [48], ANT-DSR [49], ANT-DYMO [50], HOPNET [51] и др.

Маршрутная информация хранится в феромонных таблицах, которые представляют собой дистанционно-векторные двумерные матрицы. В природе роль таких таблиц выполняют феромоны. Пересылка контрольных пакетов и данных происходит стохастически с помощью этих таблиц (рис. 5). Представленный узел сети имеет в качестве своих соседей узлы X , Y и Z , узлами назначения являются все узлы сети. Сеть состоит из N узлов.

Муравьиные алгоритмы собирают маршрутную информацию посредством метода повторяющегося сэмпирования возможных маршрутов между узлом-источником и узлом-получателем, используя контрольные пакеты — муравьев. В высоко динамичных сетях, таких как FANET, для повышения эффективности и надежности используют

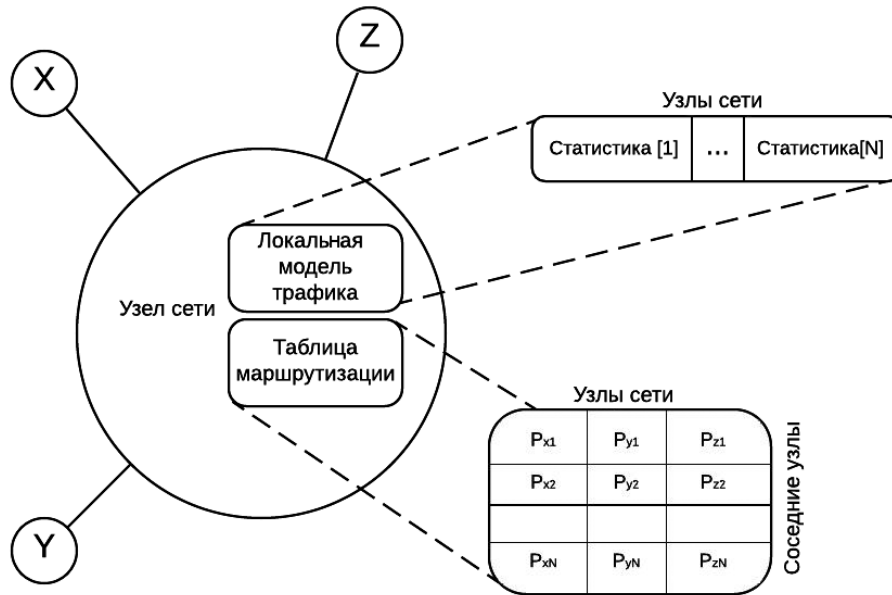


Рис. 5. Структура феромонной таблицы

ся механизмы создания резервных маршрутов, не имеющих общих сетевых узлов, процедуры «ремонта» маршрута, по которым передавались данные, в момент разрыва соединения и т. д.

Наибольшую эффективность продемонстрировали гибридные алгоритмы [52]. Рассмотрим гибридный многопутевой алгоритм AntHocNet. Данный алгоритм использует три множества муравьев: реактивные RF-муравьи (reactive forward ants), проактивные PF-муравьи (proactive forward ants) (рис. 6) и В-муравьи (backward ants). RF-муравей ищет путь к узлу назначения и превращается в В-муравья, когда достигает его. Когда начинается передача данных, запускаются проактивные PF-муравьи, контролирующие качество используемых путей. Такие агенты могут быть отправлены с малой вероятностью по широковещательной рассылке для исследования новых путей

Путь $Path$, который прошел RF-муравей, записывается в стек и используется В-муравьем для возврата в узел-источник (рис. 7). В-муравей пошагово вычисляет время $\hat{T}_{Path}$, которое понадобится пакету данных для достижения узла назначения при передвижении по пути $Path$. Это время используется для обновления таблицы маршрутизации:

$$\hat{T}_{Path} = \sum_{i=1}^{n-1} \hat{T}_{i \rightarrow i+1}, \quad i \in Path, \quad (11)$$

где $\hat{T}_{i \rightarrow i+1}$ — локальная оценка времени перехода из узла i в узел $i + 1$, $\hat{T}_{i \rightarrow i+1} = (Q_{mac}^i + 1) \cdot \hat{T}_{mac}^i$; $\hat{T}_{mac}^i$ — среднее время отправки одного пакета; Q_{mac}^i — текущее количество пакетов в очереди для отправки на MAC-уровне.

$\hat{T}_{mac}^i$ вычисляется как скользящее среднее время, прошедшее между прибытием пакета на MAC-уровне и окончанием успешной отправки:

$$\hat{T}_{mac}^i = \alpha \hat{T}_{mac}^i + (1 + \alpha) t_{mac}^i, \quad (12)$$

где $\alpha \in [0, 1]$, t_{mac}^i — время, затрачиваемое на отправку пакета из узла i .

В каждом промежуточном узле $i \in Path$ В-муравей настраивает путь по направлению к узлу-приемнику d , создавая или обновляя записи T_{nd}^i таблицы маршрутизации. По прибытии в узел i из соседнего узла n муравьи создают запись в таблице маршрутизации T_p , помечая n как следующий ретрансляционный участок достижения узла d . Запись i содержит значение феромона T_{nd}^i , которое определяет полезность пути в узел d через узел n . Если $\hat{T}_{i \rightarrow d}$ время движения, полученное муравьем, и h — ко-

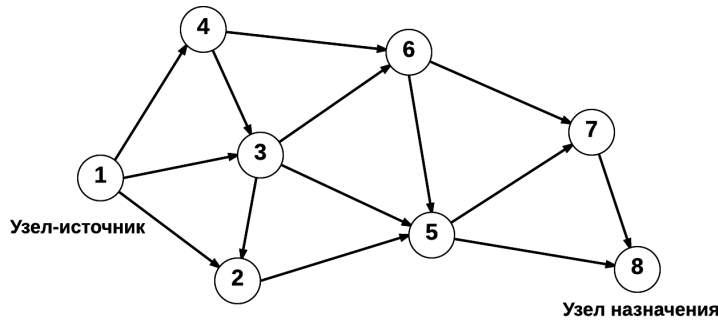


Рис. 6. Установление реактивного соединения. RF-муравей ищет путь к узлу назначения

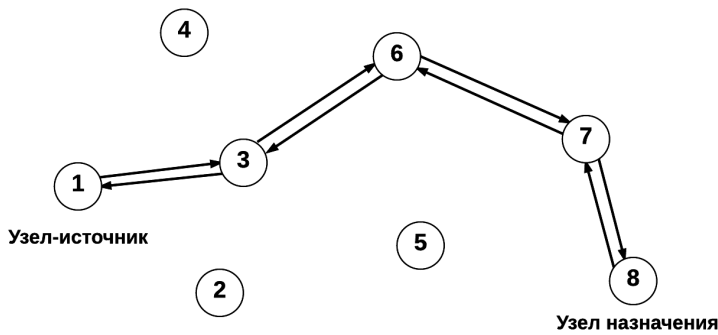


Рис. 7. RF-муравей превращается в В-муравья для возврата в узел-источник

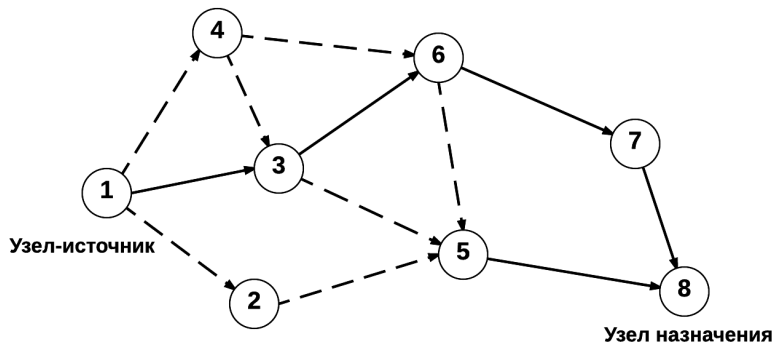


Рис. 8. Контроль качества путей с использованием проактивных PF-муравьев

личество ретрансляционных участков, то значение феромона определяется как

$$\tau_{id} = \left(\frac{(\hat{T}_{i \rightarrow d} + hT_{hop})}{2} \right)^{-1}, \quad (13)$$

где T_{hop} — фиксированное значение времени нахождения одного ретрансляционного участка в незагруженном состоянии. Если в T уже находится запись T_{nd}^i , то ее значение обновляется с помощью взвешенного среднего:

$$T_{nd}^i = \gamma T_{nd}^i + (1 - \gamma) \tau_{id}, \quad \gamma \in [0, 1]. \quad (14)$$

Узлы в AntHocNet маршрутизируют данные стохастически. Если на пути к узлу d узел k имеет множество вероятных ретрансляционных участков n , то один из них выбирается с вероятностью P_{nd} :

$$P_{nd} = \frac{T_{nd}^2}{\sum_{i \in N_d} T_{id}^2}. \quad (15)$$

PF-муравьи используются для периоди-

ческого контроля качества путей (рис. 8). Эти агенты перемещаются по следу феромона по тому же пути, что и пакеты данных, и могут быть отправлены по ширококестательной рассылке. Число ширококестательных рассылок не превышает двух. Если F-муравей не находит маршрутной информации на расстоянии двух ретрансляционных участков, он удаляется.

Для улучшения маршрутизации RF-муравьев и PF-муравьев в AntHocNet используются Hello-пакеты. С их помощью узлы собирают информацию о своих текущих соседях и хранят ее в феромонных таблицах. Если узлом-приемником является соседний узел, то муравей отправляется в него без использования ширококестательной рассылки.

Узлы могут обнаруживать отказы линий связи. Потерянная линия считается «важной», если она часто использовалась для отправки данных, или если нет альтернативных путей к соседнему узлу. В этом случае узел должен попытаться восстановить путь.

После отказа узел отправляет по ширококестательной рассылке восстанавливающего муравья (route repair ant), который движется к узлу-цели как RF-муравей. Он использует маршрутную информацию, когда это возможно. В остальных случаях он использует ширококестательную рассылку. Узел ожидает возвращения восстанавливающего муравья в течение времени, равного $5 \cdot T_{k \rightarrow d}$, где $T_{k \rightarrow d}$ — последняя оценка времени достижения узла d из узла k . Если восстанавливающий муравей не возвращается, то считается, что найти альтернативный путь невозможно, и запись о потерянном пути (узле) удаляется из таблицы маршрутизации [41].

Имитационное моделирование

Проведение сравнительного анализа протоколов маршрутизации затруднено прежде всего тем, что на процесс передачи данных в самоорганизующихся Ad Hoc сетях влияет большое количество различных факторов, многие из которых носят случайный характер и слабо поддаются строгому математическому анализу.

Моделирование протоколов маршрутизации осуществляется посредством программных симуляторов сетей, к ним относятся ns-2 [53], ns-3 [54], RIVERBED MODELER [55], OMNET++ [56], QualNet [57].

В данной работе исследования протоколов маршрутизации проводились в сетевом симуляторе ns-2. Для моделирования была использована версия 2.35, а также установлен протокол AntHocNet. Сравнение проводилось с протоколами, модели которых реализованы в ns-2: AODV, DSDV, DSR. Параметры для проведения имитационного моделирования, представленные в табл. 2, были одинаковыми для всех протоколов маршрутизации.

Для выполнения анализа производительности протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet использованы следующие параметры:

1. Процент доставленных пакетов (Packet Delivery Ratio — PDR). Этот параметр определяется соотношением между количеством пакетов, отправленных от узла-источника к узлу назначения, и количеством пакетов, фактически полученных узлом назначения:

$$PDR = \frac{R_x}{T_x}, \quad (16)$$

где R_x — количество пакетов, полученных узлом-получателем; T_x — количество пакетов, отправленных узлом-источником [58].

2. Сквозная задержка (End-to-End delay): задержка между первым переданным байтом и последним полученным байтом. Она включает в себя задержку передачи, задержки очереди процесса и задержку распространения [59].

3. Пропускная способность (Throughput) определяет скорость успешной доставки пакетов по каналу связи. На производительность пропускной способности влияет ряд факторов, в том числе объем трафика, тип трафика, время ожидания между узлом-источника и узлом назначения [60].

4. Полезная пропускная способность (Goodput) определяется из производительности полосы пропускания канала минус потери трафика для создания сеансов, подтверждений и инкапсуляции [61].

5. Накладные расходы на маршрутиза-

Таблица 2

Параметры имитационного моделирования

Параметры	Значение
Simulated area	1500 × 1500 м
Mobility model	Random waypoint (пауза 0 с)
UAV number	10, 20, 50, 100
Simulation runs	10
Simulation duration	100 с
Maximum nodes velocity	30 м/с
Traffic type	CBR
CBR packets per second	10
MAC layer protocol	802.11
Connections number	10, 20, 25, 50
Signal Propagation Model	Friis
Data links antenna	Omni
Transport Protocol	UDP
Packet size	512 Bytes

цию (Routing Overhead): накладные расходы на поиск маршрутов и построение таблицы маршрутизации [62].

Результаты имитационного моделирования

В данном разделе представлен экспериментальный анализ протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet.

Было предположено, что с ростом количества узлов и с увеличением их подвижности протокол AntHocNet будет вести себя

лучше, чем другие протоколы, такие как AODV, DSDV и DSR. Для того чтобы проверить данную гипотезу, было проведено компьютерное моделирование мобильной сети с данными протоколами и с изменяемыми значениями количества узлов и скорости узлов.

На рис. 9 видно, что для малого количества узлов разница в значении задержки для всех протоколов малозаметна, но с ростом размерности задачи задержки для про-

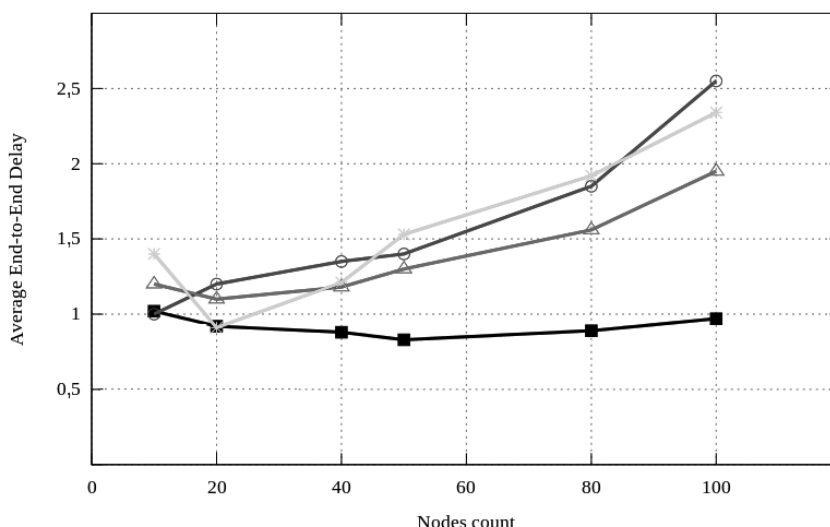


Рис. 9. Соотношение сквозной задержки и количества узлов (■) AntHocNet; (●) AODV; (▲) DSR; (★) DSDV

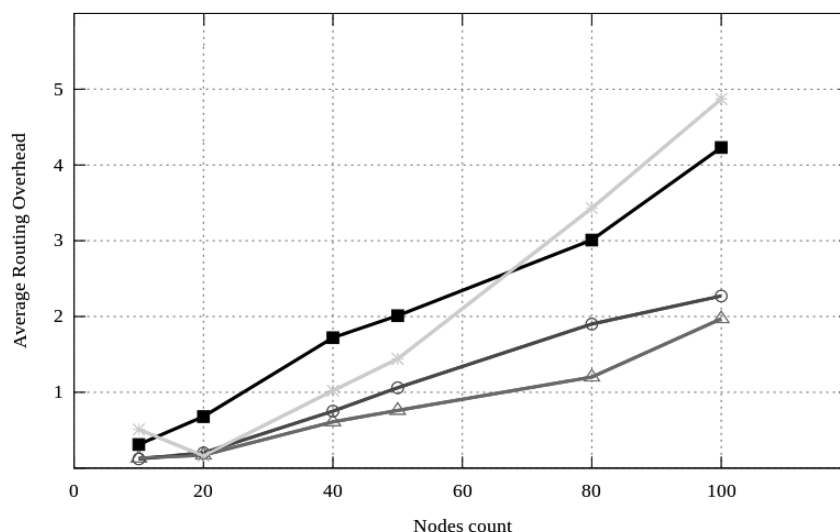


Рис. 10. Соотношение служебного трафика и количества узлов
(—■—) AntHocNet; (—○—) AODV; (—△—) DSR; (—×—) DSDV

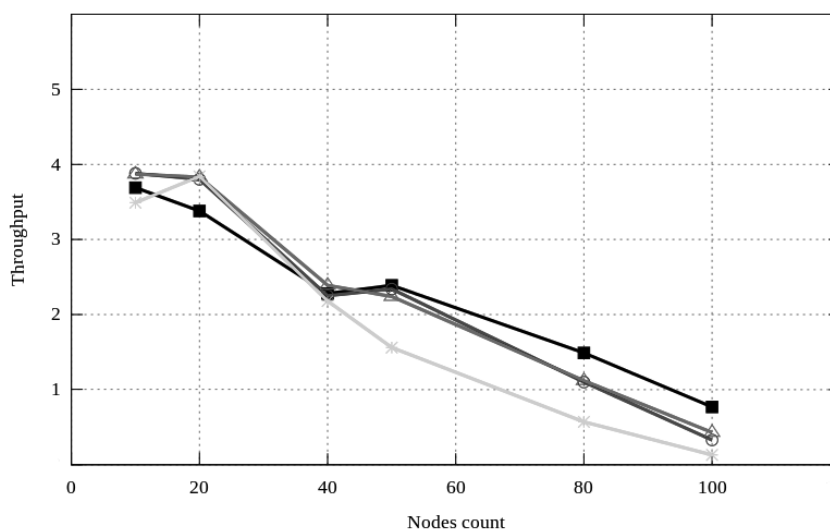


Рис. 11. Соотношение пропускной способности и количества узлов
(—■—) AntHocNet; (—○—) AODV; (—△—) DSR; (—×—) DSDV

токолов AODV DSDV и DSR значительно растут, тогда как у протокола AntHocNet задержки либо растут незначительно, либо остаются такими же.

На рис. 10 отражены значения издержек маршрутизации относительно количества узлов. AntHocNet имеет большие издержки по сравнению с AODV и DSDV и сопоставимую, иногда меньшую, издержку по сравнению с DSR. С ростом числа узлов издержки протоколов AODV и DSDV растут, тогда как издержки AntHocNet остаются

прежними либо растут незначительно.

На рис. 11 видно, что пропускная способность AntHocNet лучше, чем у AODV, DSDV и DSR при большом количестве узлов. Можно сказать, что протокол AntHocNet имеет большую стабильность по отношению к другим протоколам, упомянутым в статье. Несмотря на то, что у протокола DSR были такие же или большие издержки, чем у AntHocNet, пропускная способность DSR немного лучше т. к. большие пакеты маршрутизации AntHocNet заполняют всю

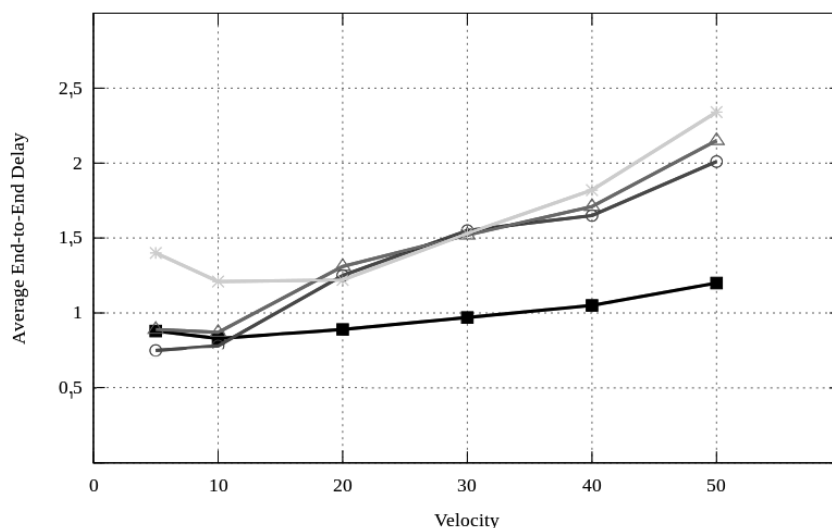


Рис. 12. Соотношение сквозной задержки и скорости движения узлов
(—■—) AntHocNet; (—○—) AODV; (—△—) DSR; (—*—) DSDV

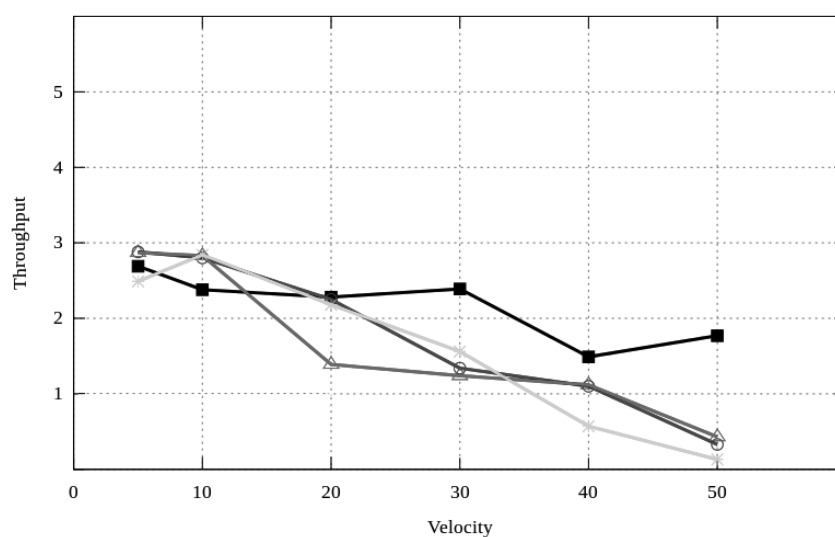


Рис. 13. Соотношение пропускной способности и скорости движения узлов
(—■—) AntHocNet; (—○—) AODV; (—△—) DSR; (—*—) DSDV

пропускную способность канала.

На рис. 12–14 представлены результаты моделирования для постоянного числа узлов, но для различных скоростей. На них прослеживаются те же тенденции, что и на предыдущих рисунках.

На рис. 12 показано, что рост подвижности узлов почти не влияет на задержки сети для протокола AntHocNet, однако другие протоколы чувствительны к большим скоростям, особенно AODV.

На рис. 13 видно, что несмотря на боль-

шие издержки AntHocNet показывает лучшие результаты пропускной способности сети по сравнению с другими протоколами.

На рис. 14 видно, что AntHocNet более стабилен по сравнению с другими протоколами в условиях большой мобильности узлов.

На основе результатов исследования, полученных в ходе проведения серии тестов, можно сделать вывод, что протокол AntHocNet имеет в целом лучшие показатели по the metric like end-to-end delay,

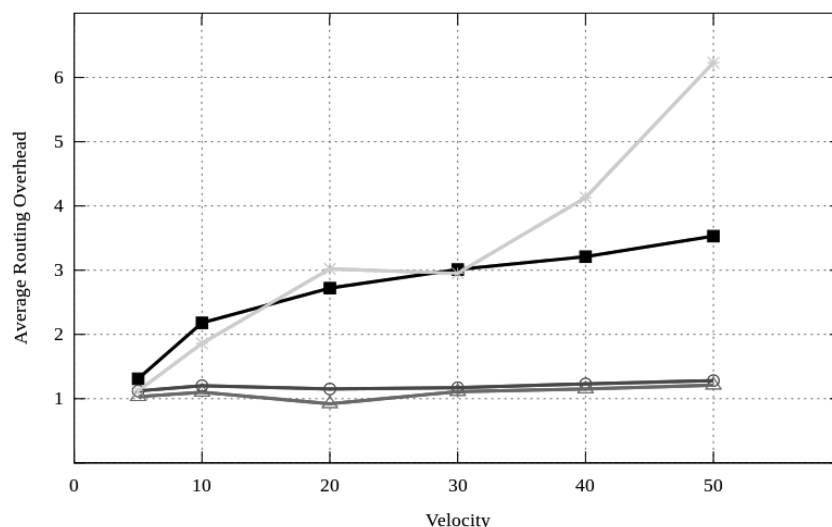


Рис. 14. Соотношение служебного трафика и скорости движения узлов
(—■—) AntHocNet; (---○---) AODV; (---△---) DSR; (—×—) DSDV

throughput and goodput по сравнению с протоколами AODV, DSDV и DSR. Рассмотренный протокол маршрутизации AntHocNet имеет хорошую масштабируемость и может быть рекомендован для организации сетей FANET, характеризующихся высокой скоростью передачи данных и высокой подвижностью узлов.

Отдельно стоит отметить тот факт, что в отличие от ранее проведенных исследований нами впервые было реализовано сравнение протоколов маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet с целью получения экспериментального подтверждения возможности эффективного использования протоколов на базе алгоритма муравьиной колонии в сетях FANET.

Маршрутизация в сетях FANET является сложной задачей из-за динамически изменяющейся топологии и высокой мобильности узлов. Рассмотренные методы маршрутизации дают представление о разнообразии и специфике способов обмена данными в FANET.

Существуют различные подходы к решению задачи маршрутизации на основе применения муравьиных алгоритмов, которые были проанализированы в ходе подготовки научной статьи. Применение муравьиных алгоритмов, основанных на

вероятностных правилах и использующих эвристически задаваемые параметры, позволяет снизить вероятность возникновения отказов в обслуживании и перегрузок в сети, что подтверждается результатами исследования.

В проведенном экспериментальном исследовании проанализированы протоколы маршрутизации AODV, DSDV, DSR и AntHocNet. Протокол AntHocNet имеет преимущество в работе над протоколами AODV и DSDV с точки зрения соотношения доставки пакетов, end-to-end delay, особенно в условиях большого количества узлов. Это связано с тем, что AODV и DSDV плохо работают в ситуациях с высокой подвижностью узлов. Из эксперимента видно, что для сети с высокой динамичностью узлов лучше подходят протоколы DSR и AntHocNet. Однако AntHocNet менее эффективен из-за высоких накладных расходов по передаче служебной информации о маршрутизации.

На сегодняшний день не существует универсального решения для задачи передачи данных, тем не менее решения, базирующиеся на методах муравьиной колонии, демонстрируют свою эффективность. Дальнейшим перспективным направлением исследований в рассматриваемой области является разработка и реализация гибрид-



ного алгоритма на основе муравьиного и пчелиного алгоритмов, что позволит нивелировать недостатки одного алгоритма преимуществами другого, увеличить произ-

водительность сети, сократить требования к аппаратным ресурсам узлов и уменьшить накладные расходы (количество передаваемой служебной информации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S.** Flying Ad Hoc Networks (FANETs) // A Survey. *Ad Hoc Netw.* 2013. Vol. 11. No. 3. Pp. 1254–1270.
2. **Tareque M.H., Hossain M.S., Atiquzzaman M.** On the Routing in Flying Ad Hoc Networks // *Proc. of the Federated Conf. on Computer Science and Information Systems.* 2015. Vol. 5. Pp. 1–9.
3. **Vasiliev D.S., Meitis D.S., Abilov A.** Simulation-based Comparison of AODV, OLSR and HWMP Protocols for Flying Ad Hoc Networks // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems.* 2014. Vol. 8638. Pp. 245–252.
4. **Pei G., Gerla M., Chen T.-W.** Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks // *Communications.* 2000. Vol. 1. Pp. 70–74.
5. **Clausen T., Jacquet P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC 3626. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. (Дата обращения: 23.03.2016).
6. **Alshbatat A.I., Dong L.** Cross Layer Design for Mobile Ad Hoc Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks // *Networking, Sensing and Control.* 2010. Pp. 331–336.
7. **Paul A.B., Nandi S.** Modified Optimized Link State Routing (M-OLSR) for Wireless Mesh Networks // *Internat. Conf. on Information Technology.* 2008. Pp. 147–152.
8. **Sharma S.** P-OLSR: Position-based Optimized Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks // *Local Computer Networks.* 2009. Pp. 237–240.
9. **Belhassen M., Belghith A., Abid M.A.** Performance Evaluation of a Cartography Enhanced OLSR for Mobile Multi-Hop Ad Hoc Networks // *Wireless Advanced.* 2011. Pp. 149–155.
10. **Perkins C.E., Bhagwat P.** Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review.* 1994. Vol. 24. Pp. 234–244.
11. **WikiStart – Open-Mesh – Open Mesh.** URL: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>. (Дата обращения: 11.02.2016).
12. **Narra H., Cetinkaya E.K., Sterbenz J.P.** Performance Analysis of AeroRP with Ground Station Advertisements // *Proc. of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Airborne Networks and Communications.* 2012. Pp. 43–47.
13. **Tiwari A.** Mobility Aware Routing for the Airborne Network Backbone // *Military Communications Conf.* 2008. Pp. 1–7.
14. **Zhou Q., Gu W., Li J., Sun Q., Yang F.** A Topology Aware Routing Protocol Based ADS-B System for Aeronautical Ad Hoc Networks // *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing.* 2012. Pp. 1–4.
15. **Kaddoura M., Trent B., Ramanujan R., Hadynski G.** BGP-MX: Border Gateway Protocol with Mobility Extensions // *Military Communications Conf.* 2011. Pp. 687–692.
16. **RFC 3561 – Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing.** URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>. (Дата обращения: 11.02.2016).
17. **Aggarwal A.** AODVSEC: A Novel Approach to Secure Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing Protocol from Insider Attacks in MANETs. // *Int. J. Comput. Netw. Commun.* 2012. Vol. 4. No. 4. Pp. 191–210.
18. **Forsmann J.H., Hiromoto R.E., Svoboda J.** A Time-Slotted on-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Unmanned Vehicle Systems // *Defense and Security Symp.* 2007. Vol. 6561. Pp. 6561P–65611P.
19. **Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing.** URL: <https://www.ietf.org/proceedings/48/I-D/manet-maodv-00.txt>. (Дата обращения: 12.02.2016).
20. **RFC 4728 – The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4.** URL: <http://www.rfc-base.org/rfc-4728.html>. (Дата обращения: 12.02.2016).
21. **Hou X., Tipper D., Kabara J.** Label-Based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks // *Proc. 6th Internat. Symp. on Advanced Radio Technologies.* 2004. Pp. 113–118.
22. **Billington J., Yuan C.** On Modelling and Analysing the Dynamic MANET on-Demand (DYMO) Routing Protocol // *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency.* 2009. Pp. 98–126.
23. **Kuperman G., Veytser L., Cheng B.-N.,**

Moore S., Narula-Tam A. A Comparison of OLSR and OSPF-MDR for Large-Scale Airborne Mobile Ad Hoc Networks // Proc. of the 3rd ACM Workshop on Airborne Networks and Communications. 2014. Pp. 17–22.

24. **ZRP.** URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=374554>. (Дата обращения: 11.02.2016).

25. **Ramasubramanian V., Haas Z.J., Sirer E.G.** SHARP: A Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // Proc. of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2003. Pp. 303–314.

26. **Pei G., Gerla M., Hong X., Chiang C.-C.** A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility // Wireless Communications and Networking Conf. 1999. Pp. 1538–1542.

27. **The Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA).** URL: <http://www.ietf.org/proceedings/40/slides/manet-tora/> (Дата обращения: 11.02.2016).

28. **Karp B., Kung H.-T.** GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks // Proc. of the 6th Annual Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking. 2000. Pp. 243–254.

29. **Lin L., Sun Q., Li J., Yang F.** A Novel Geographic Position Mobility Oriented Routing Strategy for UAVs // J. Comput. Inf. Syst. 2012. Vol. 8. No. 2. Pp. 709–716.

30. **Lidowski R.L., Mullins B.E., Baldwin R.O.** A Novel Communications Protocol Using Geographic Routing for Swarming Uavs Performing a Search Mission // Pervasive Computing and Communications. 2009. Pp. 1–7.

31. **Lin L., Sun Q., Wang S., Yang F.** A geographic mobility prediction routing protocol for Ad Hoc UAV Network // Globecom Workshops. 2012. Pp. 1597–1602.

32. **Basagni S., Chlamtac I., Syrotiuk V.R., Woodward B.A.** A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) // Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking. 1998. Pp. 76–84.

33. **Ko Y.-B., Vaidya N.H.** Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks // Wirel. Netw. 2000. Vol. 6. No. 4. Pp. 307–321.

34. **Pei G., Gerla M., Hong X.** LANMAR: Landmark Routing for Large Scale Wireless Ad Hoc Networks with Group Mobility // Proc. of the 1st ACM Internat. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2000. Pp. 11–18.

35. **Beni G., Wang J.** Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. Robots and Biological Systems // Towards a New Bionics. 1993. Pp. 703–712.

36. **New Ideas in Optimization.** URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=329055> (Дата обращения: 11.02.2016).

37. **Кажаров А.А., Курейчик В.М.** Использование шаблонных решений в муравьиных алгоритмах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7 (144). С. 17–22.

38. **Blum C.** Ant colony optimization: Introduction and recent trends // Phys. Life Rev. 2005. Vol. 2. No. 4. Pp. 353–373.

39. **Моделирование мультиагентных систем.** Доклады ученых и специалистов по проблемам разработки и исследования систем. URL: <http://topreferat.znate.ru/docs/index-3295.html?page=54> (Дата обращения: 03.12.2016).

40. **Schoonderwoerd R., Holland O.E., Bruten J.L., Rothkrantz L.J.M.** Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks // Adapt. Behav. 1997. Vol. 5. No. 2. Pp. 169–207.

41. **Ладыженский Ю.В., Мирецкая В.А., Мирецкий А.В.** Применение муравьиных алгоритмов для решения задачи маршрутизации в компьютерных сетях // Наукові Праці Донецького Національного Технічного Університету. 2007. № 8(120). С. 178–192.

42. **Di Caro G., Dorigo M.** AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks // J. Artif. Intell. Res. 1998. Pp. 317–365.

43. **Abuhmida M., Radhakrishnan K., Wells I.** ANTMANET: A Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks // Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. 2015. Pp. 210–215.

44. **Günes M., Bouazizi I., Sorges U.** ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs // Proc. 2002 ICPP Workshop Ad Hoc Netw. 2002. Pp. 79–85.

45. **Radwan A.A., Mahmoud T.M., Hussein E.H.** AntNet-RSLR: a Proposed Ant Routing Protocol for MANETs // Electronics, Communications and Photonics Conf. 2011. Pp. 1–6.

46. **Du Plessis J.** ACODV: Ant Colony Optimisation Distance Vector Routing Ad Hoc Networks. University of Pretoria South Africa, 2005.

47. **Abd Elmoniem A.M., Ibrahim H.M., Mohamed M.H., Hedar A.-R.** Ant Colony and Load Balancing Optimizations for AODV Routing Protocol // Int. J. Sens. Netw. Data Commun. 2011. Vol. 1. Pp. 1–14.



48. Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.M. AntHocNet: an Ant-based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks // *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VIII*. 2004. Pp. 461–470.
49. Aissani M., Fenouche M., Sadour H., Mellouk A. Ant-DSR: Cache Maintenance Based Routing Protocol for Mobile Ad-Hoc Networks // *Telecommunications*. 2007. The 3rd Advanced Internat. Conf. 2007. Pp. 35–35.
50. Martins J.A.P., Correia S.L.O., Celestino J. Ant-DYMO: a Bio-Inspired Algorithm for MANETS // *Telecommunications*, 2010 IEEE 17th Internat. Conf. 2010. Pp. 748–754.
51. Wang J., Osagie E., Thulasiraman P., Thulasiram R.K. HOPNET: A Hybrid Ant Colony Optimization Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Network // *Ad Hoc Netw.* 2009. Vol. 7. No. 4. Pp. 690–705.
52. Боронин П.Н., Кучерявый А.Е. Интернет вещей как новая концепция развития сетей связи // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2014. № 3 (7). С. 7–30.
53. The Network Simulator – ns-2. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Дата обращения: 03.12.2016).
54. What is ns-3. URL: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/> (Дата обращения: 03.12.2016).
55. SteelCentral Riverbed Modeler | Riverbed | GB. URL: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. (Дата обращения: 03.12.2016).
56. OMNeT++ Discrete Event Simulator – Home. URL: <https://omnetpp.org/> (Дата обращения: 03.12.2016).
57. Qualnet – Packet Trace | SCALABLE Networks. URL: <http://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator> (Дата обращения: 03.12.2016).
58. Gulati M.K., Kumar K. Performance Comparison of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols // *Int. J. Comput. Netw. Commun.* 2014. Vol. 6. No. 2. Pp. 127–142.
59. Liu J., Jiang X., Nishiyama H., Kato N., Shen X. End-to-end Delay in Mobile Ad Hoc Networks with Generalized Transmission Range and Limited Packet Redundancy // *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* 2012. Pp. 1731–1736.
60. de Moraes R.M., Sadjadpour H.R., Garcia-Luna-Aceves J.J. Throughput-Delay Analysis of Mobile Ad-Hoc Networks with a Multi-Copy Relaying Strategy // *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 1st Annual IEEE Communications Society Conf. 2004. Pp. 200–209.
61. Seddik-Ghaleb A., Ghamri-Doudane Y., Senouci S.-M. Effect of Ad Hoc Routing Protocols on TCP Performance within MANETs // *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 2006. Vol. 3. Pp. 866–873.
62. Jacquet P., Viennot L. Overhead in Mobile Ad-Hoc Network Protocols // *Research Report-3965*. INRIA, France, 2000.

REFERENCES

1. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying Ad Hoc Networks (FANETs): A Survey. *Ad Hoc Netw.*, 2013, Vol. 11, No. 3, Pp. 1254–1270.
2. Tareque M.H., Hossain M.S., Atiquzzaman M. On the Routing in Flying Ad Hoc Networks. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2015, Vol. 5, Pp. 1–9.
3. Vasiliev D.S., Meitis D.S., Abilov A. Simulation-Based Comparison of AODV, OLSR and HWMP Protocols for Flying Ad Hoc Networks. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, 2014, Vol. 8638, Pp. 245–252.
4. Pei G., Gerla M., Chen T.-W. Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks. *Communications*, 2000, Vol. 1, Pp. 70–74.
5. Clausen T., Jacquet P. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC 3626*. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. (Accessed: 23.03.2016).
6. Alshbatat A.I., Dong L. Cross Layer Design for Mobile Ad Hoc Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks. *Networking, Sensing and Control*, 2010, Pp. 331–336.
7. Paul A.B., Nandi S. Modified Optimized Link State Routing (M-OLSR) for Wireless Mesh Networks. *International Conference on Information Technology*, 2008, Pp. 147–152.
8. Sharma S. P-OLSR: Position-Based Optimized Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks. *Local Computer Networks*, 2009, Pp. 237–240.
9. Belhassen M., Belghith A., Abid M.A. Performance Evaluation of a Cartography Enhanced OLSR for Mobile Multi-Hop Ad Hoc Networks. *Wireless Advanced*, 2011, Pp. 149–155.

10. Perkins C.E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1994, Vol. 24, Pp. 234–244.
11. WikiStart – Open-Mesh – Open Mesh. Available: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>. (Accessed: 11.02.2016).
12. Narra H., Cetinkaya E.K., Sterbenz J.P. Performance Analysis of AeroRP with Ground Station Advertisements. *Proceedings of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Airborne Networks and Communications*, 2012, Pp. 43–47.
13. Tiwari A. Mobility Aware Routing for the Airborne Network Backbone. *Military Communications Conference*, 2008, Pp. 1–7.
14. Zhou Q., Gu W., Li J., Sun Q., Yang F. A Topology Aware Routing Protocol Based ADS-B System for Aeronautical Ad Hoc Networks. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2012, Pp. 1–4.
15. Kaddoura M., Trent B., Ramanujan R., Hadynski G. BGP-MX: Border Gateway Protocol with Mobility Extensions. *Military Communications Conference*, 2011, Pp. 687–692.
16. RFC 3561 – Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (Accessed: 11.02.2016).
17. Aggarwal A. AODVSEC: A Novel Approach to Secure Ad Hoc on-Demand Distance Vector (AODV) Routing Protocol from Insider Attacks in MANETs. *Int. J. Comput. Netw. Commun.*, 2012, Vol. 4, No. 4, Pp. 191–210.
18. Forsmann J.H., Hiromoto R.E., Svoboda J. A Time-Slotted on-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Unmanned Vehicle Systems. *Defense and Security Symposium*, 2007, Vol. 6561, Pp. 6561P–65611P.
19. Multicast Ad Hoc on-Demand Distance Vector (MAODV) Routing. Available: <https://www.ietf.org/proceedings/48/1-D/manet-maodv-00.txt>. (Accessed: 12.02.2016).
20. RFC 4728 – The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. Available: <http://www.rfc-base.org/rfc-4728.html>. (Accessed: 12.02.2016).
21. Hou X., Tipper D., Kabara J. Label-Based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks. *Proc. 6th International Symposium on Advanced Radio Technologies*, 2004, Pp. 113–118.
22. Billington J., Yuan C. On Modelling and Analysing the Dynamic MANET on-Demand (DYMO) Routing Protocol. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2009, Pp. 98–126.
23. Kuperman G., Veytser L., Cheng B.-N., Moore S., Narula-Tam A. A Comparison of OLSR and OSPF-MDR for Large-Scale Airborne Mobile Ad Hoc Networks. *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Airborne Networks and Communications*, 2014, Pp. 17–22.
24. ZRP. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=374554> (Accessed: 11.02.2016).
25. Ramasubramanian V., Haas Z.J., Sirer E.G. SHARP: A hybrid adaptive routing protocol for mobile ad hoc networks. *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, 2003, Pp. 303–314.
26. Pei G., Gerla M., Hong X., Chiang C.-C. A Wireless Hierarchical Routing Protocol with Group Mobility. *Wireless Communications and Networking Conference*, 1999, Pp. 1538–1542.
27. The Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA). Available: <http://www.ietf.org/proceedings/40/slides/manet-tora/> (Accessed: 11.02.2016).
28. Karp B., Kung H.-T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2000, Pp. 243–254.
29. Lin L., Sun Q., Li J., Yang F. A Novel Geographic Position Mobility Oriented Routing Strategy for UAVs. *J. Comput. Inf. Syst.*, 2012, Vol. 8, No. 2, Pp. 709–716.
30. Lidowski R.L., Mullins B.E., Baldwin R.O. A Novel Communications Protocol Using Geographic Routing for Swarming Uavs Performing a Search Mission. *Pervasive Computing and Communications*, 2009, Pp. 1–7.
31. Lin L., Sun Q., Wang S., Yang F. A Geographic Mobility Prediction Routing Protocol for Ad Hoc UAV Network. *Globecom Workshops*, 2012, Pp. 1597–1602.
32. Basagni S., Chlamtac I., Syrotiuk V.R., Woodward B.A. A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM). *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, 1998, Pp. 76–84.
33. Ko Y.-B., Vaidya N.H. Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. *Wirel. Netw.*, 2000, Vol. 6, No. 4, Pp. 307–321.
34. Pei G., Gerla M., Hong X. LANMAR: Landmark Routing for Large Scale Wireless Ad Hoc Networks with Group Mobility. *Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, 2000, Pp. 11–18.
35. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. *Robots and*



Biological Systems: Towards a New Bionics, 1993, Pp. 703–712.

36. *New Ideas in Optimization*. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=329055> (Accessed: 11.02.2016).

37. **Kazharov A.A., Kureychik V. M.** Ispolzovaniye shablonnykh resheniy v muravinykh algoritмах [Template using for ant colony algorithms]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, No. 7 (144), Pp. 17–22. (rus)

38. **Blum C.** Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Phys. Life Rev.*, 2005, Vol. 2, No. 4, Pp. 353–373.

39. *Modelirovaniye multiagentnykh system. Doklady uchenykh i spetsialistov po problemam razrabotki i issledovaniya system [Modeling of Multi-Agent Systems - Reports of Scientists and Specialists on Problems of System Development and Research]*. Available: <http://topreferat.znate.ru/docs/index-3295.html?page=54> (Accessed: 03.12.2016). (rus)

40. **Schoonderwoerd R., Holland O.E., Bruten J.L., Rothkrantz L.J.M.** Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks. *Adapt. Behav.*, 1997, Vol. 5, No. 2, Pp. 169–207.

41. **Ladyzhenskij Ju.V., Mireckaja V.A., Mireckij A.V.** Primenenie murav'inykh algoritmov dlja reshenija zadachi marshrutizacii v komp'yuternykh setjah [Usage of Ant-Based Algorithms for Solving Routing Problem in the Computer Networks]. *Naukovi Praci Donec'kogo Nacional'nogo Tehnichnogo Universitetu*, 2007, No. 8 (120), Pp. 178–192. (rus)

42. **Di Caro G., Dorigo M.** AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. *J. Artif. Intell. Res.*, 1998, Pp. 317–365.

43. **Abuhmida M., Radhakrishnan K., Wells I.** ANTMANET: A Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 2015, Pp. 210–215.

44. **Günes M., Bouazizi I., Sorges U.** ARA – The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs. *Proc 2002 ICCP Workshop Ad Hoc Netw.*, 2002, Pp. 79–85.

45. **Radwan A.A., Mahmoud T.M., Hussein E.H.** AntNet-RSLR: a Proposed Ant Routing Protocol for MANETs. *Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2011, Pp. 1–6.

46. **Du Plessis J.** *ACODV: Ant Colony Optimisation Distance Vector Routing Ad Hoc Networks*. University of Pretoria South Africa, 2005.

47. **Abd Elmoniem A.M., Ibrahim H.M., Mohamed M.H., Hedar A.-R.** Ant Colony and Load Balancing Optimizations for AODV Routing Protocol. *Int. J. Sens. Netw. Data Commun.*, 2011,

Vol. 1, Pp. 1–14.

48. **Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.M.** AntHocNet: an Ant-Based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VIII*, 2004, Pp. 461–470.

49. **Aissani M., Fenouche M., Sadour H., Mellouk A.** Ant-DSR: Cache Maintenance Based Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Telecommunications, The 3rd Advanced International Conference*, 2007, Pp. 35–35.

50. **Martins J.A.P., Correia S.L.O., Celestino J.** Ant-DYMO: a Bio-Inspired Algorithm for MANETS. *Telecommunications, 2010 IEEE 17th International Conference*, 2010, Pp. 748–754.

51. **Wang J., Osagie E., Thulasiraman P., Thulasiram R.K.** HOPNET: A Hybrid Ant Colony Optimization Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Network. *Ad Hoc Netw.*, 2009, Vol. 7, No. 4, Pp. 690–705.

52. **Boronin P.N., Kucheryavyy A.Ye.** Internet veshchey kak novaya kontseptsiya razvitiya setey svyazi [Internet of Things as a New Concept of the Telecommunication Networks Development]. *Informatsionnyye tekhnologii i telekommunikatsii*, 2014, No. 3 (7), Pp. 7–30. (rus)

53. *The Network Simulator – ns-2*. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Accessed: 03.12.2016).

54. *What is ns-3*. Available: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/> (Accessed: 03.12.2016).

55. *SteelCentral Riverbed Modeler | Riverbed | GB*. Available: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. (Accessed: 03.12.2016).

56. *OMNeT++ Discrete Event Simulator – Home*. Available: <https://omnetpp.org/> (Accessed: 03.12.2016).

57. *Qualnet – Packet Trace | SCALABLE Networks*. Available: <http://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator> (Accessed: 03.12.2016).

58. **Gulati M.K., Kumar K.** Performance Comparison of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols. *Int. J. Comput. Netw. Commun.*, 2014, Vol. 6, No. 2, Pp. 127–142.

59. **Liu J., Jiang X., Nishiyama H., Kato N., Shen X.** End-to-end Delay in Mobile Ad Hoc Networks with Generalized Transmission Range and Limited Packet Redundancy. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2012, Pp. 1731–1736.

60. **de Moraes R.M., Sadjadpour H.R., Garcia-Luna-Aceves J.J.** Throughput-Delay Analysis of Mobile Ad Hoc Networks with a Multi-Copy

Relaying Strategy. *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. First Annual IEEE Communications Society Conference*, 2004, Pp. 200–209.

61. Seddik-Ghaleb A., Ghamri-Doudane Y., Senouci S.-M. Effect of Ad Hoc Routing Protocols on TCP Performance within MANETs. *3rd Annual*

IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006, Vol. 3, Pp. 866–873.

62. Jacquet P., Viennot L. Overhead in Mobile Ad Hoc Network Protocols. *Research Report-3965*, INRIA, France, 2000.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЛЕОНОВ Алексей Викторович

LEONOV Alexey V.

E-mail: kot@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017

DOI: 10.18721/JCSTCS.10102

УДК 004.725.5, 621.396

АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В.И. Петров¹, Д.А. Молчанов², Е.А. Кучерявый³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича

Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Российский университет дружбы народов
Москва, Российская Федерация;

³ Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
Москва, Российская Федерация

Проведен анализ интерференции в беспроводных сетях, работающих в терагерцовом диапазоне частот. Получены выражения для среднего значения интерференции на приемнике с учетом специфических особенностей распространения электромагнитных волн терагерцового диапазона частот, таких как использование направленных антенн, ослабление сигнала вследствие молекулярной абсорбции, а также блокировка сигнала телом человека. Построены зависимости среднего значения интерференции от коэффициента абсорбции, плотности интерферирующих узлов и других параметров. Проведено сравнение результатов, полученных для двух упрощенных диаграмм направленности. Результаты могут в дальнейшем использоваться для получения оценок среднего значения сигнал-интерференция в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот, а также для анализа емкости таких сетей.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот; беспроводные сети; анализ интерференции.

INTERFERENCE ANALYSIS IN TERAHERTZ BAND WIRELESS NETWORKS

V.I. Petrov¹, D.A. Moltchanov², Ye.A. Koucheryavy³

¹ Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications
St. Petersburg, Russian Federation;

² Peoples' Friendship University of Russia
Moscow, Russian Federation;

³ National Research University “Higher School of Economics”
Moscow, Russian Federation

In this paper, the analysis of interference in wireless terahertz band networks is presented. The estimation of the mean level of interference at the target receiver is performed, taking into account such inherent properties of the terahertz band systems as the use of highly-directional antennas, signal attenuation caused by molecular absorption, as well as signal blockage by the human body. Additionally, the comparison of the results for two simplified antenna radiation patterns is performed. The obtained results can be used as a building block for further performance evaluation of terahertz band wireless networks, including the estimation of signal-to-interference ratio and network capacity.

Keywords: terahertz band; wireless networks; interference analysis.

Беспроводные сети передачи данных, работающие в терагерцовом диапазоне частот (0,3–3 ТГц), являются перспективным решением для замены текущих беспроводных локальных сетей, работающих в дециметровом (0,3–3 ГГц) и сантиметровом (3–30 ГГц) диапазонах частот, на расстояниях до нескольких десятков метров [1].

По сравнению с текущими беспроводными сетями, использование терагерцового диапазона частот позволит существенно увеличить пропускную способность сети, а также уменьшить размеры приемопередающих устройств. В то же время, терагерцовый канал связи обладает специфическими особенностями, такими как высокий уровень молекулярной абсорбции (поглощения электромагнитного излучения в атмосфере) и существенным ослаблением сигнала при прохождении через препятствия (включая тело человека).

Меньший размер антенных элементов в свою очередь ведет к снижению эффективной апертуры антенны, что негативно сказывается на дальности связи. Для борьбы с данным эффектом предполагается использование антенных систем, состоящих из множества элементов [2]. Коррелированный выбор фаз для каждого отдельного антенного элемента позволяет образовать результирующую диаграмму направленности с узким лучом из множества отдельных диаграмм направленности с относительно

широким лучом (см. рис. 1 для случая антенной системы с $8 \times 8 = 64$ элементами).

Так как отмеченные выше особенности могут оказывать существенное влияние на работу беспроводных сетей терагерцового диапазона частот, они должны быть учтены при оценке характеристик сети.

Одной из важных задач в оценке характеристик беспроводных сетей связи является анализ интерференции, который позволяет оценить теоретически достижимую скорость передачи, а также влияет на выбор протоколов множественного доступа к среде. Цель статьи – анализ интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот с учетом направленности антенн, молекулярной абсорбции, а также блокировки терагерцового излучения телом человека. Для анализа используются методы стохастической геометрии, с помощью которых получены выражения для средней интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот для двух диаграмм направленности передающих и приемных антенн.

Модель системы

Расположение узлов. Модель системы включает приемник, расположенный в начале координат, а также случайное поле интерферирующих узлов. Для расположения интерферирующих узлов используется пуассоновский точечный процесс с

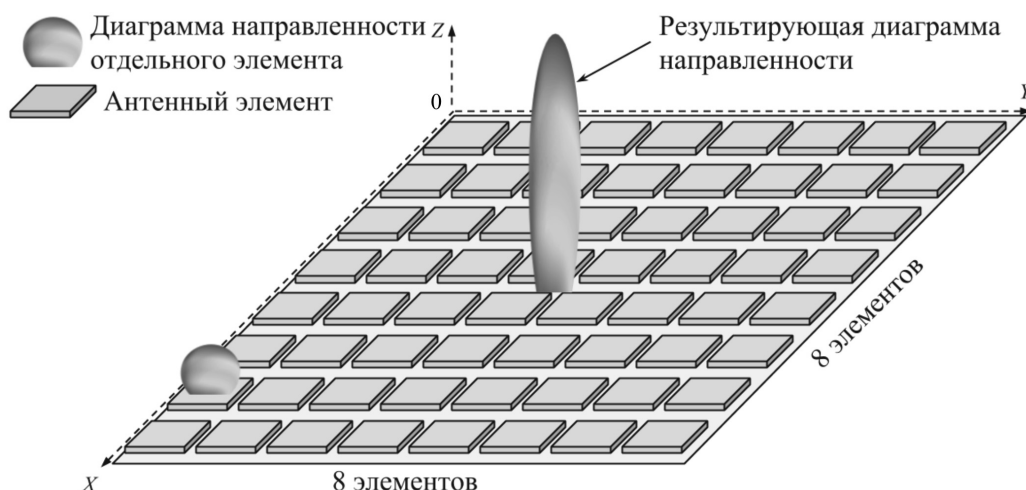


Рис. 1. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 1»

интенсивностью λ . Направления основных лепестков как приемника, так и интерферирующих узлов распределены равномерно на полуинтервале $[0; 2\pi)$. Каждый из интерферирующих узлов окружен окружностью радиуса r_B , моделирующей проекцию тела человека (например, пользователя сети с носимым устройством). Область интерференции вокруг приемника радиуса R рассчитана таким образом, что интерференция от узлов вне этого радиуса меньше порога теплового шума.

Диаграммы направленности. В работе рассмотрены два возможных типа

диаграмм направленности (рис. 2 и 3). Диаграмма направленности «Тип 1» моделируется единственным главным лепестком, коэффициент усиления внутри которого одинаков и равен G . Диаграмма направленности «Тип 2» моделируется главным лепестком, коэффициент усиления внутри которого одинаков и равен G_1 , а также множеством боковых лепестков, коэффициент усиления внутри которых одинаков и равен G_2 .

Для работы с используемыми диаграммами направленности необходимо определить коэффициенты усиления G , G_1 и G_2

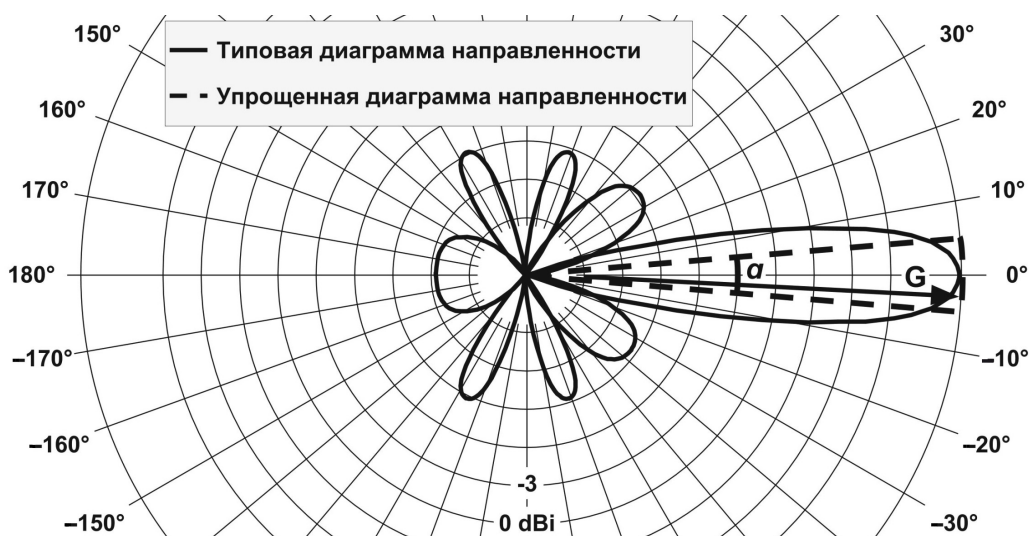


Рис. 2. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 1»

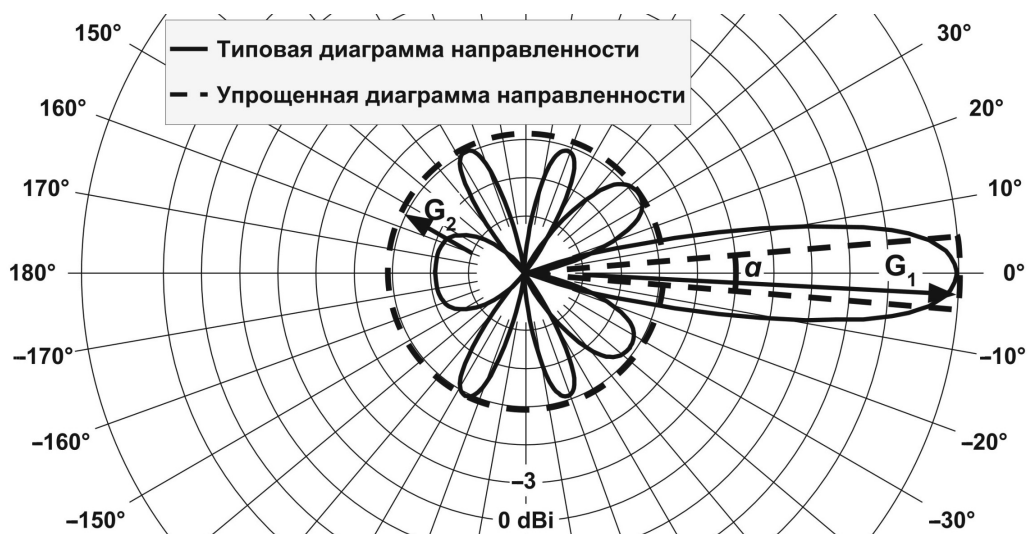


Рис. 3. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 2»

как функции от угла диаграммы направленности α . Для диаграммы направленности «Тип 1» характерна концентрация всей излучаемой энергии в единственном конусообразном лепестке. Следовательно, коэффициент усиления G должен увеличиваться обратно пропорционально площади образуемого сегмента сферы S , вычисляемого по формуле $S = 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha / 2)]$.

Таким образом, с учетом ослабления сигнала при распространении в среде, коэффициент усиления G может быть вычислен как

$$G = \frac{2}{1 - \cos(\alpha / 2)}.$$

Аналогичным образом могут быть получены и коэффициенты усиления для диаграммы направленности «Тип 2»:

$$\begin{cases} G_1 = 2[(1 - \cos(\alpha / 2)) + k(1 + \cos(\alpha / 2))]^{-1}, \\ G_2 = kG_1 \end{cases},$$

где k — коэффициент, связывающий G_1 и G_2 .

Модель распространения. В связи с существенным уровнем молекулярной абсорбции модель распространения сигнала в терагерцовом диапазоне частот отличается от моделей, используемых для дециметрового и сантиметрового диапазонов частот (например, используемых при анализе технологий Wi-Fi, LTE и других технологий, работающих в диапазоне 2–6 ГГц). Следуя результатам, полученным в [3, 4], величина интерференции на приемнике I может определяться как

$$I = A \sum_{i=1}^N r_i^{-2} e^{-Kr_i},$$

где N — число интерферирующих узлов, оказывающих влияние на приемник; r_i — расстояние от интерферирующего узла до приемника; K — коэффициент абсорбции; A — коэффициент, определяемый выражением

$A = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2} = H G_{Tx} G_{Rx}$, где

P_{Tx} — мощность интерферирующего узла, G_{Tx} — коэффициент усиления антенны на интерферирующем узле, G_{Rx} — коэффициент усиления антенны на приемнике,

c — скорость света, f — частота передаваемого сигнала, H — коэффициент, используемый для упрощения последующих вычислений, равный $H = P_{Tx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2}$.

Коэффициенты G_{Tx} и G_{Rx} могут быть получены как функции от угла диаграммы направленности с использованием формул для G , G_1 и G_2 , приведенных выше.

Следуя [5], предполагается, что человеческое тело полностью блокирует прохождение терагерцового сигнала. Иными словами, ослабление сигнала при прохождении через тело настолько велико, что вклад данной компоненты в интерференцию на приемнике несущественен.

Анализ интерференции

Анализ блокировки. В пуассоновском поле интерферирующих узлов абоненты могут являться причиной блокировки. Следуя результатам из [6], получим вероятность блокировки сигнала от интерферирующего узла p_B , как функцию от удаления от данного узла x , следующим образом:

$$p_B(x) = 1 - e^{-\lambda_I (x - r_B) r_B},$$

где r_B — радиус интерферирующего узла.

Посторонние люди в зоне действия приемника также могут блокировать распространение интерференции. При моделировании расположения посторонних людей с помощью пуассоновского процесса с интенсивностью λ_B предыдущая формула остается применимой, если заменить λ_I на $(\lambda_I + \lambda_B)$, где λ_B — интенсивность посторонних людей.

Анализ интерференции для диаграммы направленности «Тип 1». Рассмотрим случай, когда направленные антенны используются только на передающей или только на приемной стороне. Интерферирующий узел в радиусе R от приемника не будет создавать интерференцию всего в двух случаях: если зона покрытия передатчика не включает приемник / зона покрытия приемника не включает передатчик (для упрощения дальнейшего изложения предположим первый вариант), и если распространение интерференции заблокировано другим интерферирующим узлом.



Вероятность второго события определяется величиной p_B , полученной в предыдущем разделе. Что касается первого события, то вероятность того, что зона покрытия передатчика включает приемник p_C , для диаграммы направленности «Тип 1» может быть получена как

$$p_C = \frac{\alpha x}{2\pi x} = \frac{\alpha}{2\pi}.$$

Рассмотрим бесконечно малое приращение dr . Поскольку процесс расположения интерферирующих узлов является пуассоновским [5], множественные события в пределах dr невозможны. Следовательно, вероятность того, что интерферирующий узел находится на расстоянии r от приемника, пропорциональна значению dr . Таким образом, элементарное приращение кольца может быть вычислено по формуле:

$$\pi(r + dr)^2 - \pi r^2 = 2\pi r dr + O, \quad (1)$$

из которой следует, что вероятность нахождения интерферирующего узла в интервале $(r, r + dr)$ может быть вычислена как $2\pi\lambda_I r dr$.

Когда интерферирующий узел на расстоянии r от приемника не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия интерферирующего узла, вклад указанного узла в интерференцию на приемнике равен $A r^{-2} e^{-K r}$. С учетом данного факта среднее значение интерференции на приемнике $E[I]$ может быть вычислено по следующей формуле [4]:

$$E[I] = \int_{r_B}^R A r^{-2} e^{-K r} p_C [1 - p_B(r)] 2\lambda_I \pi r dr.$$

При подстановке значений вероятностей p_B и p_C среднее значение интерференции на приемнике может быть записано как

$$E[I] = \int_{r_B}^R A r^{-2} e^{-K r} e^{-\lambda_I (x - r_B) r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr = A \alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K),$$

где $\Theta(R, r_B, \lambda_I, K)$ может быть вычислено как

$$\Theta = e^{-\lambda_I r_B^2} Ei(-R[K + \lambda_I r_B]) - Ei(-r_B^2[K + \lambda_I r_B]),$$

где $Ei(x)$ — интегральная показательная функция.

Когда блокировка не учитывается, среднее значение интерференции на приемнике может быть получено чуть проще:

$$E[I] = A \alpha \lambda_I \int_{r_B}^R \frac{1}{r} e^{-K r} dr = A \alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K),$$

где $\Theta_1(R, r_B, K) = Ei(-K R) - Ei(-K r_B)$.

В случае использования всенаправленной антенны то же самое выражение может быть приведено к следующему виду:

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A \Theta(R, r_B, \lambda_I, K).$$

При объединении допущений о всенаправленных антеннах и отсутствии блокировки среднее значение интерференции на приемнике может быть вычислено как

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A \Theta_1(R, r_B, K).$$

Наконец, если направленные антенны предполагаются как на приемной, так и на передающей стороне, среднее значение интерференции может быть получено домножением приведенных выше результатов на $\alpha/2\pi$ с учетом блокировки:

$$E[I] = \frac{A \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K)$$

и без учета блокировки:

$$E[I] = \frac{A \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K).$$

Анализ интерференции для диаграммы направленности «Тип 2». При использовании диаграммы направленности «Тип 2» требуется различать три случая для выбранного интерферирующего узла:

- 1) сигнал от интерферирующего узла заблокирован;
- 2) сигнал от интерферирующего узла не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия основного лепестка диаграммы направленности интерферирующего узла;
- 3) сигнал от интерферирующего узла не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия боковых лепестков диаграммы направленности интерферирующего узла.

Вероятность первого события равна p_B , а вклад выбранного интерферирующего узла в интерференцию на приемнике равен нулю. Вероятность второго события равна $p_C(1 - p_B)$, а вклад выбранного интерферирующего узла в интерференцию на прием-

нике равен $A_1 r^{-2} e^{-Kr}$, где A_1 — коэффициент, вычисляемый аналогично коэффициенту A , только для основного лепестка диаграммы направленности «Тип 2». Вероятность третьего события, в свою очередь, равна $(1 - p_C)(1 - p_B)$, а вклад интерферирующего узла в интерференцию на приемнике равен $A_2 r^{-2} e^{-Kr}$, где A_2 вычисляется аналогично A_1 только для боковых лепестков диаграммы направленности «Тип 2».

Таким образом, среднее значение интерференции на приемнике при использовании диаграммы направленности «Тип 2» описывается формулой

$$E[I] = \int_{r_B}^R A_1 r^{-2} e^{-Kr} p_C p_A 2\lambda_I \pi r dr + \int_{r_B}^R A_2 r^{-2} e^{-Kr} (1 - p_C) p_A 2\lambda_I \pi r dr,$$

которая после взятия интеграла и упрощения приводится к следующему виду:

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K).$$

По аналогии с анализом интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» рассмотрим несколько специальных случаев.

Во-первых, при игнорировании эффекта блокировки среднее значение интерференции на приемнике вычисляется с помощью следующей формулы:

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K).$$

Во-вторых, при использовании направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне, среднее значение интерференции описывается с учетом блокировки как

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K);$$

без учета блокировки как

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K).$$

Стоит также отметить, что предложенный подход позволяет моделировать различные углы диаграммы направленности на интерферирующих узлах и на приемнике.

Анализ интерференции с учетом молекулярного шума. Молекулярный шум — одно из явлений, характерных для терагерцового диапазона частот, чья природа была теоретически предсказана в [7], но пока не была подтверждена экспериментально [8].

Предложенный подход может быть модифицирован для того, чтобы учесть влияние молекулярного шума. Так как молекулярный шум, вызванный излучением от интерферирующих узлов, также оказывает негативное влияние на приемник [9], он может быть учтен при оценке среднего значения интерференции на приемнике посредством замены $A r^{-2} e^{-Kr}$ на $A r^{-2}$ [7]. В этом случае среднее значение интерференции на приемнике для диаграммы направленности «Тип 1» будет описываться следующим выражением:

$$E[I] = \int_{r_B}^R A r^{-2} e^{-\lambda_I (x-r_B) r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr = A \alpha \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I),$$

где $\Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I)$ может быть вычислена как

$$\Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I) = e^{-\lambda_I r_B} E(-\lambda_I r_B R) - E(-\lambda_I r_B^2).$$

Аналогично, для диаграммы направленности «Тип 2» среднее значение интерференции на приемнике с учетом молекулярного шума равно

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I) + A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I).$$

При использовании направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне среднее значение интерференции с учетом молекулярного шума равно для диаграммы «Тип 1»:

$$E[I] = \frac{A \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I);$$

для диаграммы «Тип 2»:

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K).$$

Приведенные выше формулы будут использованы в следующем разделе при построении численных оценок интерференции на приемнике.

Численные результаты и их интерпретация

В данном разделе приведены примеры численных результатов, иллюстрирующих поведение среднего значения интерференции на приемнике в различных условиях.

Результаты получены с использованием формул, выведенных в предыдущем разделе.

На рис. 4 приведено среднее значение интерференции как функции коэффициента абсорбции для разных углов направленности для диаграммы направленности «Тип 1». Рисунок демонстрирует сильную зависимость между коэффициентом абсорбции K и средним значением интер-

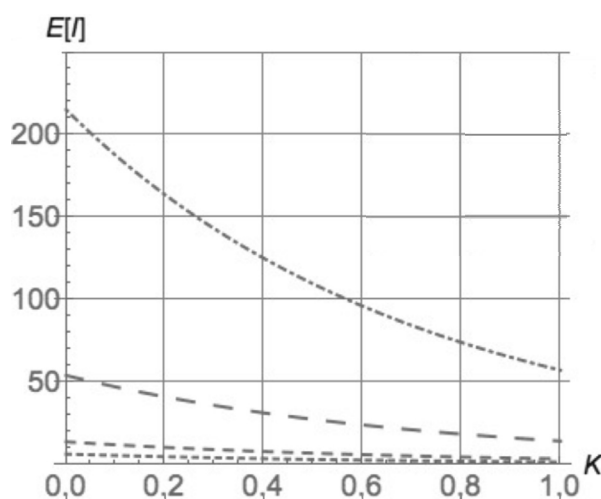


Рис. 4. Среднее значение интерференции как функции коэффициента абсорбции для разных углов направленности
(----) $\alpha = \pi/2$; (- · -) $\alpha = \pi/3$; (—) $\alpha = \pi/6$; (— · —) $\alpha = \pi/12$

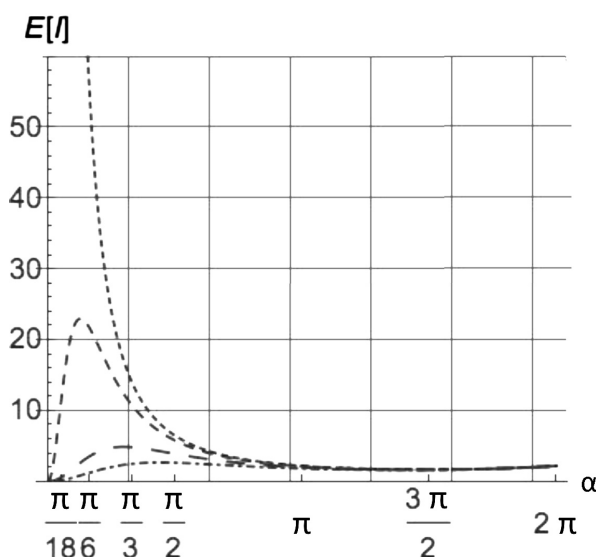


Рис. 5. Среднее значение интерференции как функции от угла направленности для разных типов диаграммы направленности
(----) «Тип 1»; (- · -) «Тип 2», $k = 0,01$; (—) «Тип 2», $k = 0,05$; (— · —) «Тип 2», $k = 0,10$

ференции на приемнике, тем самым обосновывая необходимость учета эффекта молекулярной абсорбции в построении моделей связи для сетей терагерцового диапазона частот. Зафиксировав угол диаграммы направленности, мы также можем отметить, что среднее значение интерференции ожидаемо уменьшается с увеличением коэффициента абсорбции. Аналогичным образом, зафиксировав значение коэффициента абсорбции, мы наблюдаем рост среднего значения интерференции на приемнике с увеличением направленности антенны (уменьшением угла диаграммы направленности).

На рис. 5 приведена зависимость среднего значения интерференции от угла направленности и выбранного типа диаграммы направленности («Тип 1» или «Тип 2»). Поскольку диаграмма направленности «Тип 1» концентрирует всю излучаемую мощность в основном лепестке, среднее значение интерференции на приемнике для диаграммы направленности «Тип 1» выше. В то же время диаграмма направленности «Тип 2» обладает большей гибкостью, т. к. позволяет варьировать долю энергии, излучаемой в направлении боковых лепестков, с помощью коэффициента k . Зависимость среднего значения интерференции на приемнике от угла диаграммы направленности α для диаграммы направленности «Тип 2» имеет принципиально другой вид, чем для диаграммы направленности «Тип 1». В то же время, при уменьшении коэффициента k значение функции для диаграммы направленности «Тип 2» ожидаемо приближается к таковому для диаграммы направленности «Тип 1».

Значение коэффициента k может значительно меняться в зависимости от конкретной антенны (во множестве исследований коэффициент k принимают равным зна-

чению из отрезка $[0,1-0,2]$ [10]). С учетом данного факта использование диаграммы направленности «Тип 2» является предпочтительным для анализа интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот. В то же время использование диаграммы направленности «Тип 1» существенно упрощает анализ и финальные выражения, поэтому предпочтительно для построения «грубых» оценок среднего значения интерференции.

В статье рассмотрена задача построения аналитической модели для оценки интерференции в беспроводных сетях, работающих в терагерцовом диапазоне частот, со случайным расположением интерферирующих узлов. Изучены две упрощенные диаграммы направленности, для каждой из которых получены итоговые выражения для оценки среднего значения интерференции как функции от угла направленности диаграммы, коэффициента абсорбции, плотности интерферирующих узлов и других параметров сети.

На основе анализа полученных выражений можно сделать следующие выводы. Во-первых, среднее значение интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» увеличивается с уменьшением угла направленности. Во-вторых, среднее значение интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» уменьшается с увеличением коэффициента абсорбции. В-третьих, вид функции средней интерференции от угла диаграммы направленности для диаграммы направленности «Тип 2» принципиально отличается от вида функции для диаграммы направленности «Тип 1». В то же время при стремлении параметра k к нулю разница между результатами для диаграммы направленности «Тип 1» и «Тип 2» также стремится к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurner T., Priebe S. Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2014. Vol. 35. No. 1. Pp 53–62.
2. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing Ultra-

Massive MIMO (1024×1024) Communication in the (0.06–10) Terahertz Band, Elsevier // Nano Communication Networks. 2016. Vol. 8. Pp. 46–54.

3. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Femtosecond-Long Pulse-Based Modulation for Terahertz Band Communication in Nanonetworks // IEEE



Transactions on Communications. 2014. Vol. 62. No. 5. Pp. 1742–1754.

4. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. No. 3. Pp. 1791–1808.

5. Akdeniz M.R., Liu Y., Samimi M.K., Sun S., Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32. No. 6. Pp. 1164–1179.

6. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas // Proc. of the

IEEE Global Communications Conf. Washington, DC USA, 2016.

7. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2011. Vol. 10. No. 10. Pp. 3211–3221.

8. Kokkonen J., Lehtomaki J., Juntti M. A Discussion on Molecular Absorption Noise in the Terahertz Band, Elsevier // Nano Communication Networks. 2016. Vol. 8. Pp. 35–45.

9. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Dense Terahertz Networks // Proc. of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conf. Boston, MA, USA, 2015.

10. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd Ed. Prentice Hall, 2002. 736 p.

REFERENCES

1. Kurner T., Priebe S. Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, Vol. 35, No. 1, Pp 53–62.

2. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing Ultra-Massive MIMO (1024×1024) Communication in the (0.06–10) Terahertz Band, Elsevier, *Nano Communication Networks*, 2016, Vol. 8, Pp. 46–54.

3. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Femtosecond-Long Pulse-Based Modulation for Terahertz Band Communication in Nanonetworks. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, Vol. 62, No. 5, Pp. 1742–1754.

4. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, Vol. 16, No. 3, Pp. 1791–1808.

5. Akdeniz M.R., Liu Y., Samimi M.K., Sun S., Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,

2014, Vol. 32, No. 6, Pp. 1164–1179.

6. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas. *In the Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM)*, Washington, DC USA, 2016

7. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, Vol. 10, No. 10, Pp. 3211–3221.

8. Kokkonen J., Lehtomaki J., Juntti M. A Discussion on Molecular Absorption Noise in the Terahertz Band, Elsevier. *Nano Communication Networks*, 2016, Vol. 8, Pp. 35–45.

9. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Dense Terahertz Networks. *In the Proceedings of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2015-Fall)*, Boston, MA, USA, 2015.

10. Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, 2002, 736 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ПЕТРОВ Виталий Игоревич

PETROV Vitaly I.

E-mail: vit.petrov@gmail.com

МОЛЧАНОВ Дмитрий Александрович

MOLTCHANOV Dmitry A.

E-mail: moltchanov.dmitri@gmail.com

КУЧЕРЯВЫЙ Евгений Андреевич
KOUCHERYAVY Yevgeni A.
E-mail: yevgeni.koucheryavy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017

DOI: 10.18721/JCSTCS.10103

УДК 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО И РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С. Вэй¹, В.М. Ольшанский², С.В. Волков², Е.А. Богачев³, С.В. Волвенко⁴

¹ Харбинский инженерный университет г. Харбин, Китай;

² Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН
Москва, Россия;

³ ОАО «Композит» Московская обл., г. Королев, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Углеродные шнуры и ленты обладают рядом важных преимуществ, таких как прочность, малый удельный вес, коррозионная стойкость, в том числе к бактериям и грибам, экологичность и гибкость. Исследована возможность их применения в качестве электродов-заземлителей для подземного электротехнического и радиотехнического применения. Величина и частотная зависимость импеданса предлагаемых электродов в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц сопоставлены с таковыми для труб из нержавеющей стали, традиционно используемых для заземления и создания антенн.

Ключевые слова: подземная низкочастотная связь; заземлитель; углеродный материал; импеданс; электропроводность грунта.

IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF CARBON ELECTRODES FOR UNDERGROUND ELECTRICAL AND RADIOPHYSICAL APPLICATIONS

X. Wei¹, V.M. Ol'shanskiy², S.V. Volkov², E.A. Bogachev³, S.V. Volvenko⁴

¹ Harbin Engineering University Harbin, China;

² A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution
Moscow, Russian Federation;

³ OJSC "Composite" Moscow Region, Korolev, Russian Federation

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Carbon cords and tapes have a number of important benefits, such as strength, low specific weight, corrosion resistance, including against bacteria and fungi, environmental friendliness and flexibility. We investigated the possibility of using them as grounding electrodes for underground electrical and electronic applications. The magnitude and the frequency dependence of the electrodes impedance in the range of

10 Hz ÷ 10 kHz were compared with those of stainless steel pipes traditionally used for grounding and dipole antennas design.

Keywords: underground low-frequency communications; earth electrode; carbon material; impedance; ground conductivity.

Коррозионная стойкость и механическая прочность материалов, используемых для подземного применения в различных областях техники, особенно важны при организации заземлений. В этой связи большой интерес представляют тканые углеродные материалы. Эти материалы разрабатывались для нужд авиационной и космической промышленности исходя из требований удельных прочностных характеристик. Между тем их электрические свойства представляют не меньший интерес.

Обеспечение хорошего электрического контакта с грунтом или водой часто требуется в различных электротехнических и радиофизических задачах, например, для организации подземной низкочастотной связи или для электроразведки. К заземлителям предъявляется три основных требования: низкое сопротивление, малая дисперсия импеданса в области низких частот, коррозионная устойчивость. Выполненные ранее исследования [1, 2] показали, что названным требованиям лучше всего удовлетворяют электроды из графита или нержавеющей стали.

Однако графит и нержавеющая сталь — материалы достаточно тяжелые, а графит еще и очень хрупок. Современная промышленность предлагает значительно более легкие и гибкие углеродные материалы: шнуры и ленты из углеродного волокна. Очевидно, что возможность использования углеродных шнуров и лент требовала

тщательной экспериментальной проверки, главным образом из опасений, что относительно большое продольное сопротивление будет препятствовать получению низкого сопротивления заземления. Такие экспериментальные исследования ранее не проводились.

В настоящей работе мы ориентировались прежде всего на задачи аварийной подземной связи для шахтеров и спелеологов. Поскольку в аварийной ситуации нет времени на бурение специальных отверстий для электродов или на другие земляные работы, то с практической точки зрения интереснее всего варианты, когда шнуры и ленты просто раскладываются по поверхности и лишь слегка присыпаются грунтом. Однако полученные результаты на наш взгляд представляют интерес и для более широкого круга приложений, включая организацию промышленных и бытовых заземлений.

Основная цель данной работы — исследование импедансных характеристик контакта тканых углеродных материалов с почвой в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц.

Методы и материалы

Применяемая методика измерений и аппаратура аналогичны описанным в [2]. Для измерений частотных характеристик мы использовали лабораторный измеритель импедансов Z-350M, обеспечивающий измерения реальной и мнимой компонент

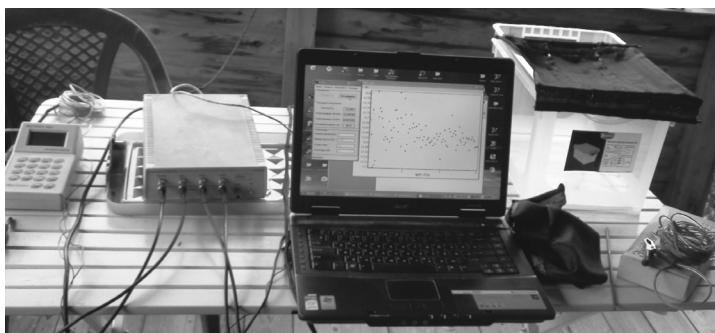


Рис. 1. Лабораторная установка для экспериментов с углеродными материалами

импеданса в диапазоне от 1 Гц до 1 МГц. Нас интересовал более узкий диапазон — 10 Гц ÷ 10 кГц. Для измерения электропроводности воды использовался кондуктометр «Эксперт-002».

Однако если ранее мы использовали относительно небольшие электроды длиной несколько сантиметров, то настоящие исследования выполнялись на электродах длиной 3–4 м, что соответствует практическому применению. Измерения проводились либо в пластиковом контейнере с размером дна 35×23 см, высотой 22 см, либо в открытом грунте. Вид лабораторной установки показан на рис. 1.

В экспериментах использовался шнур технический углеродный ШТУ (ТУ 1916-003-18070047-98, содержание углерода не менее 99 % масс.) и углеродная лента шириной 100 мм из ткани марки УВИС-Т с поверхностной плотностью 245 г/м².

Шнур из углеродного волокна имел полную длину 420 см, диаметр 6 мм, измеренный вес 73 г, т. е. погонная плотность такого шнура составляет 17 г на метр длины. Для сравнения: вес двухметровой трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 см, которая традиционно использовалась нами в качестве электрода-заземлителя, составляет 1,86 кг или 930 г на метр длины, т. е. в 54 раза больше. Измеренное продольное сопротивление шнура при полной длине составило 13,6 Ом. При складывании вдвое сопротивление уменьшается вчетве-

ро за счет уменьшения длины и увеличения площади сечения: измеренное значение составило 3,55 Ом. При складывании еще вдвое, т. е. до длины около 1 м, измеренное сопротивление составило 1,0 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Лента из углеродной ткани имела полную длину 358 см, измеренный вес 88 г. Это соответствует погонной плотности 25 г/м. Продольное сопротивление ленты, сложенной вдвое, составило 2,7 Ом, сложенной вчетверо (длина около 90 см) — 0,7 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Для измерения электропроводности грунта использовался названный выше пластиковый контейнер. Из трех углеродных лент были сшиты электроды по размеру торцов контейнера. Электрический контакт с этими торцевыми электродами обеспечивался за счет латунных трубок диаметром 3 мм.

Продольное сопротивление ткани при измерении между вставленными по краям латунными трубками составило 2 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Перед измерением сопротивления грунта осуществлялась калибровка по воде. В контейнер было залито 12 л водопроводной



Рис. 2. Измерение электропроводности влажной глины с использованием в качестве торцевых электродов угольной ткани.
Справа шнур из углеродного материала

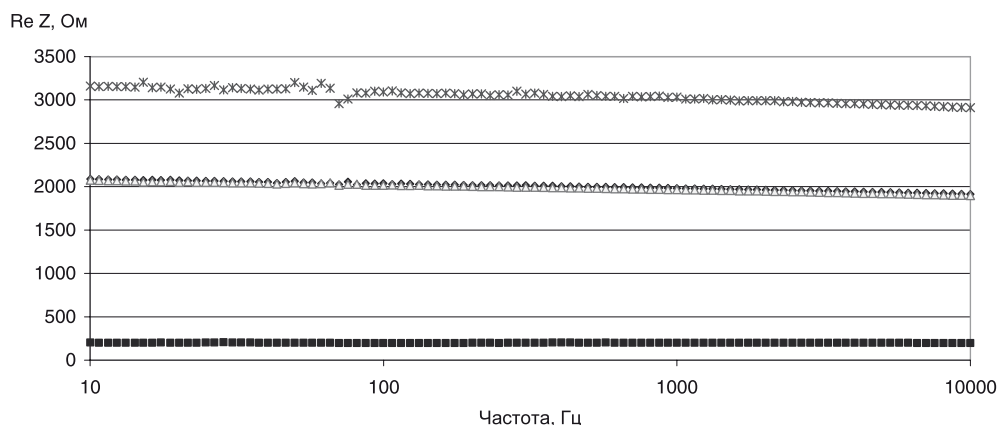


Рис. 3. Зависимость действительной части импеданса в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для глины, почвы и воды
(♦) глина; (Δ) глина повтор; (×) почва; (■) вода 533 мкСм/см

воды. Удельная электропроводность, измеренная кондуктометром «Эксперт – 002», составила 533,7 мкСм/см. Для такого значения электропроводности с учетом размеров дна аквариума (35×23 см) и уровня воды (15 см) сопротивление должно составлять $R = 35 / (0,000534 \times 23 \times 15) = 190$ Ом. Измеренное значение составило 199 Ом, т. е. на 5 % больше, что, с учетом закруглений контейнера и влияния сопротивлений торцевых электродов, вполне приемлемо.

При засыпке в контейнер 12 л влажной

глины (рис. 2) среднее измеренное значение сопротивления составило 2012 Ом при измерении сразу после засыпки грунта и 1994 Ом при повторных измерениях через 30 мин, когда контакт между глиной и торцевыми электродами лучше пропитался влагой. Это соответствует электропроводности 5 мСм/м.

Помимо электропроводности влажной глины измерялась электропроводность верхнего плодородного слоя почвы. Среднее значение составило 3059 Ом, что соот-

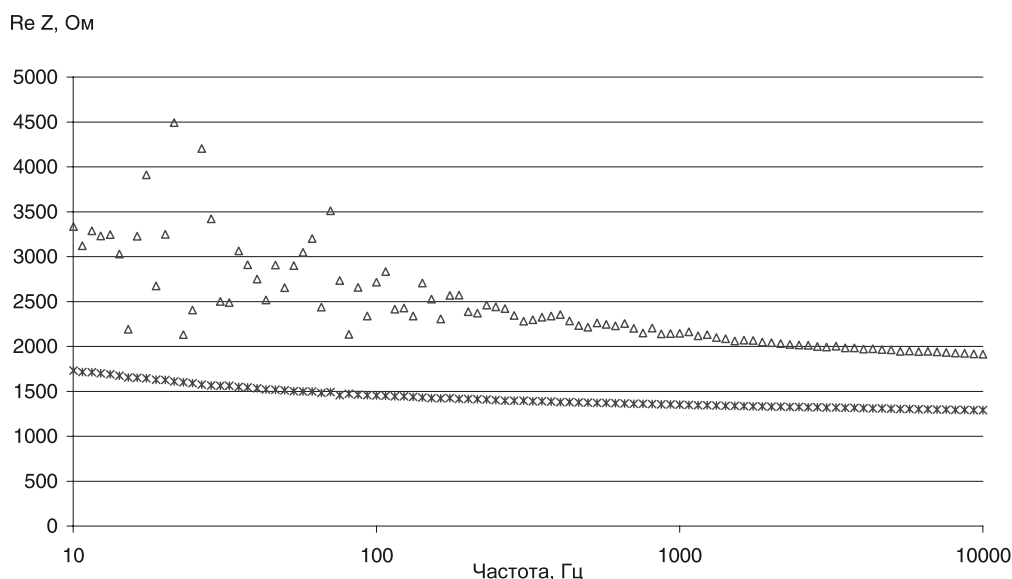


Рис. 4. Зависимость реальной части импеданса от частоты в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для латунных трубок, воткнутых в глину
(Δ) латунная трубка в центре ящика с глиной; (×) латунные трубки в ящике с глиной

ветствует электропроводности 3,3 мСм/м.

На рис. 3 показаны величины действительной части импеданса в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для глины, почвы и воды. На более низких частотах сопротивление выше, но изменение сопротивления в указанном диапазоне в целом не превышает 10 %.

Среднее значение мнимой части составляет 40 Ом для глины, 56 Ом для почвы и 0,9 Ом для воды.

Для сопоставления электрических свойств контактов «металл — грунт» и «углеродный материал — грунт» были проведены эксперименты, аналогичные описанным в [2]. Поскольку латунь относится к металлам, обладающим относительно низкой дисперсией электропроводности, то в качестве референтных электродов, с которыми сопоставлялись углеродные, были взяты латунные трубки.

Латунная трубка диаметром 3 мм втыкалась вертикально в глину в центре контейнера до дна контейнера. Импеданс измерялся между трубкой и одним из торцевых электродов. Среднее значение импеданса в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц составило 2442 Ом, причем результаты измерений были нестабильны, а средняя величина мнимой части импеданса составила 472 Ом, т. е. около 20 % от реальной. Затем электрод был составлен из двух разнесенных латунных трубок, воткнутых вертикально в глину и

электрически закороченных друг с другом.

Реальная часть импеданса уменьшилась до величины 1430 Ом, т. е. в 1,7 раза, а мнимая — до 119 Ом, т. е. в четыре раза. Частотная зависимость реальной части импеданса для одиночной и двоянной латунных трубок показана на рис. 4.

Затем аналогичные измерения были выполнены с углеродным шнуром, сложенным вдвое, с углеродным шнуром, вертикальные участки которого были разнесены на расстояние 9 см друг от друга, и с углеродной лентой.

Как и в случае с одиночной латунной трубкой, результаты измерений в первом из названных вариантов были нестабильны, а средняя величина реальной части импеданса относительно большой — 1750 Ом. При этом мнимая часть импеданса была заметно меньше, чем у одиночной латунной трубки — 168 Ом. При раздвижении вертикальных участков шнура на 9 см действительная часть упала до 1284 Ом (в 1,4 раза), а мнимая — до 64 Ом, т. е. в 2,6 раза. Кстати, это свидетельствует о том, что на величину мнимой части влияет не только непосредственная граница раздела «электрод — среда», но и её окрестность. Среднее значение реальной и мнимой частей импеданса углеродной ленты составило соответственно 1231 Ом и 79 Ом — значения, близкие к варианту разнесенного шнура.



Рис. 5. Измерение импедансов дипольных антенн. Стрелками отмечены заземлители, изготовленные из трубок из нержавеющей стали



Рис. 6. Шнур из углеродного материала, слегка присыпанный землей

Результаты экспериментов в открытом грунте

После этих предварительных экспериментов мы приступили к экспериментам в открытом грунте. В ходе данных экспериментов мы сопоставляли импедансы электродов, изготовленных из углеродных волокон, с импедансами традиционных заземлителей. В качестве традиционных заземлителей использовались две трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 см, вбитые в грунт на глубину 150 см

(рис. 5). Расстояние между трубками 2 м.

Сначала были измерены импедансы между этими трубками. Затем с поверхности земли удалили слой травы и на образовавшийся плодородный слой мы помещали в разных вариантах ленту и/или шнур из углеродного материала и слегка присыпали их землей, а импеданс измеряли между ними и одной из нержавеющей трубок (рис. 6).

На рис. 7 приведена измеренная зависимость действительной части импеданса от

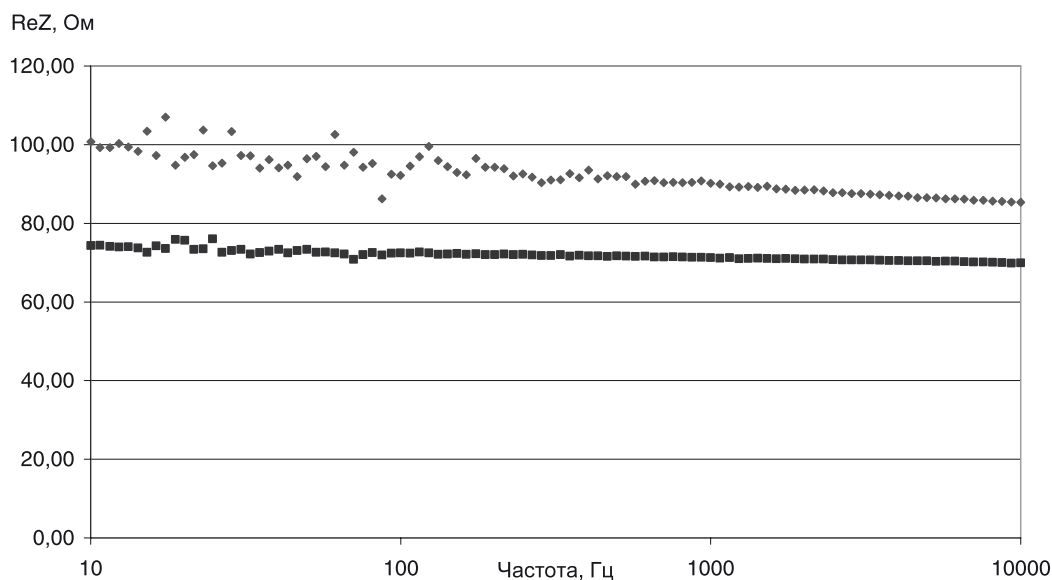


Рис. 7. Сравнение импедансов диполя, оба электрода которого выполнены из нержавеющей стали (синие квадраты), и диполя, один из электродов которого выполнен из стали, а второй — из половины описанной выше углеродной ленты (■) между двумя стальными трубками; (♦) между трубкой и половиной ленты

ReZ, Ом

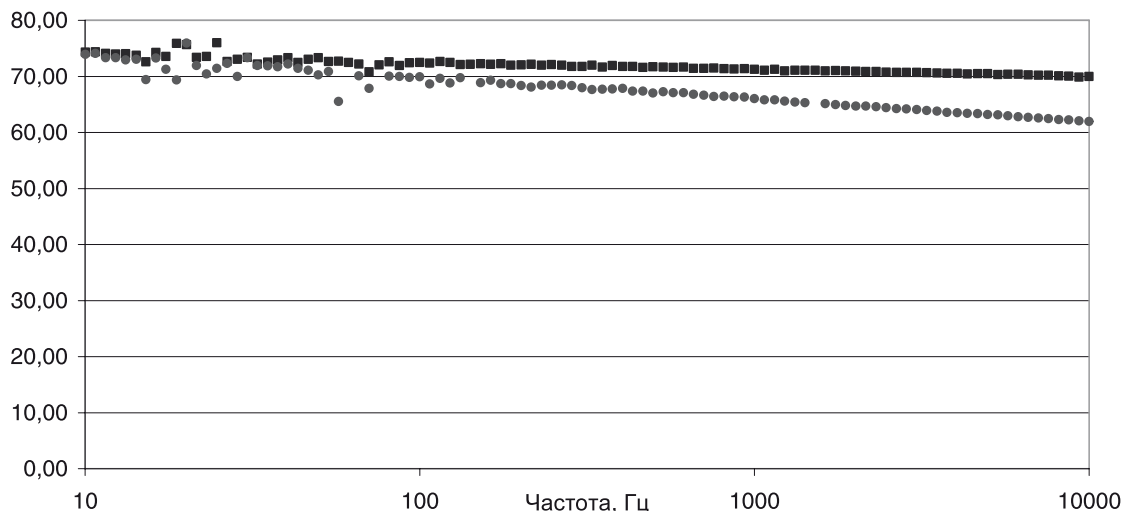


Рис. 8. Тестируемый электрод выполнен в виде полной ленты, присыпанной землей и размещенной в виде двух двухметровых участков под прямым углом друг к другу (■) между двумя стальными трубками; (●) между стальной трубкой и лентой углом

частоты для диполя из двух традиционных заземлителей из стальных трубок (синие квадраты) и диполя, один из электродов которого выполнен из половины описанной выше ленты, т. е. двухметрового отрез-

ка шириной 10 см, присыпанного грунтом. Среднее значение импеданса между трубками 72 Ом, а между трубкой и половиной ленты – 92 Ом.

В случае, когда вторая половина угле-

ReZ, Ом

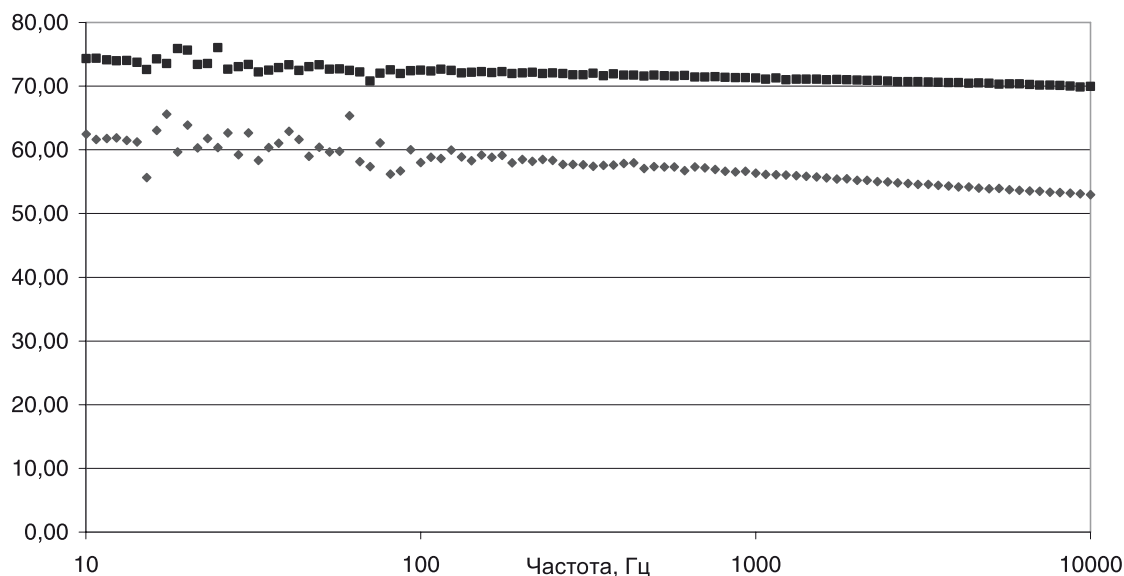


Рис. 9. Уменьшение сопротивления углеродного электрода за счет дополнительного размещения углеродного шнура рядом с углеродной лентой (■) между двумя стальными трубками; (◆) шнур лента и одинарная трубка

родной ленты также была положена на грунт под прямым углом к первоначальному участку, значение импеданса упало до 67 Ом, т. е. стало меньше, чем между двумя стальными трубками (рис. 8).

Если рядом с лентой положить углеродный шнур, а электрический контакт с проводом измерителя (с помощью зажима типа «крокодил») одновременно обеспечить с серединой и ленты, и шнура, то это приведет к уменьшению общего импеданса до 57,7 Ом или на 10 Ом (рис. 9).

Поскольку среднее сопротивление между двумя стальными трубками составляет 72 Ом, то сопротивление одной трубки примерно равно 36 Ом. Это означает, что сопротивление комбинированного углеродного электрода около 21 Ом или в 1,7 раза меньше, чем сопротивление стальной трубки. При этом стальная трубка вбита на глубину 1,5 м, из которых плодородный слой занимает не более 30 см, а остальное — глина. Как показали измерения, электропроводность глины выше, чем электропроводность плодородного слоя. То есть уменьшение импеданса углеродного электрода обусловлено не электропроводностью среды, а улучшением электрического контакта

между электродом и средой.

Чтобы убедиться в том, что большую часть в импеданс вносит именно стальной электрод, мы можем уменьшить его сопротивление за счет параллельного объединения двух стальных электродов (рис. 10).

В этом случае среднее сопротивление упало до 49,6 Ом, т. е. еще на 8 Ом. Поскольку расстояния между электродами соизмеримы с их длиной, а распределение электропроводностей нам неизвестно, то трудно четко указать, какая часть суммарного импеданса связана с комбинированным стальным электродом, а какая — с комбинированным углеродным. Но в любом случае это в 1,44 раза ниже, чем исходный импеданс диполя из традиционного материала. То есть применение легких, компактных, быстро разворачиваемых углеродных материалов с точки зрения величины импеданса не менее эффективно, чем применение тяжелых, жестких стальных труб.

Обсуждение

Полученные результаты имеет смысл сопоставить с данными из публикаций, по-

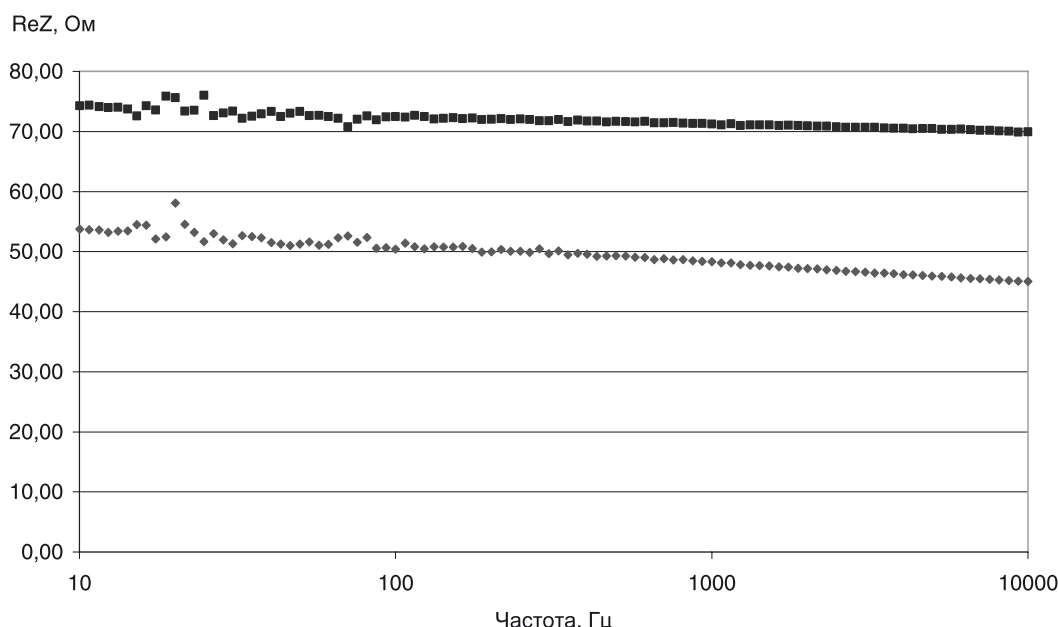


Рис. 10. Референсный электрод образован электрическим соединением двух стальных трубок
(■) между двумя стальными трубками; (♦) шнур лента и вдвоенная трубка



священных импедансам антенн для подземной связи [3–6]. В этих работах подчеркивается, что уменьшение импеданса контакта электрода и грунта является важным для повышения эффективности антенн. В работах [3–5] испанских авторов в качестве среды описаны скальные грунты электропроводностью 10^{-2} мСм/м, а в качестве электродов – лист алюминиевой фольги размером 30×45 см и стальной стержень длиной 20 см и 1 см диаметром. Фольга непосредственно прижимается к грунту, а стержень вбивается в него. Измеренные значения импедансов составили 772–1760 Ом на частоте 70 кГц. Очевидно, что для уменьшения импеданса нужно прежде всего увеличить размеры электродов и улучшить контакт между электродом и скальной породой, однако авторы почему-то про это ничего не пишут.

Аналогично обстоит и с сопротивлением непосредственного контакта между электродом и грунтом. Авторы работ [3–5] измеряют их с помощью 4-электродного метода, получая значения от 20 до 4237 Ом в зависимости от типа грунта и типа используемого электрода. Измерения этих контактов проводятся так, как будто речь идет об измерении природных явлений: тщательно, но без каких-либо модификаций области контакта. Обсуждается лишь эквивалентная схема, объясняющая вид частотной дисперсии импеданса. Казалось бы, контакты между металлами и разными веществами или растворами исследовались со времен Фридриха Вильгельма Георга Кольрауша (1840–1910), не только представившего область контакта в виде параллельного сопротивления и емкости, но и предложившего закон частотной зависимости емкостной и резистивной компонент в области низких частот. Известны пути уменьшения сопротивления этих контактов за счет буферных растворов или гелей и за счет развития поверхности металла. Есть широчайшая практика изготовления защитных заземлений со множеством рекомендаций по уменьшению импедансов. Однако испанские специалисты никаких приемов улучшения электрического контакта не применяют и не упоминают.

Величина сопротивления растекания также описывается ими как величина, задаваемая извне. Складывается впечатление, что они воспринимают её как характеристику местности, которую можно только измерить, но не уменьшить. Между тем, она определяется не только электропроводностью среды, но и топологией поля, т. е. густотой линий тока и эквипотенциалей. А топология поля определяется габаритами и формой электродов.

Если размеры электродов увеличить, то из-за увеличения поверхности уменьшится импеданс контакта, а из-за уменьшения густоты силовых линий уменьшится сопротивление растекания. Если, например, вместо 20-сантиметрового стального стержня взять метровый, то общее сопротивление должно упасть примерно в пять раз. Допустим, авторы почему-то считали, что стержень должен быть вбит на полную длину, а вбивать стержень в скальный грунт на 1 м заметно тяжелее, чем на 20 см. Но что мешало им вместо листа алюминиевой фольги размером 30×45 см раскатать полосу этой фольги хотя бы на 2 м при общей длине антенны 10 м?

Более конструктивный подход изложен в работе [6], где даны три рекомендации по уменьшению импеданса антенн:

электроды должны быть большими;

электроды имеет смысл изготавливать из труб, объединенных в параллель;

между плохо проводящим грунтом и электродом имеет смысл ввести промежуточную зону в виде геля с высокой электропроводностью.

Можно отметить, что все три идеи известны. Авторы публикации [6] тоже не претендуют на их новизну и называют в списке литературы своих предшественников. Этот список легко расширить. Например, в Патенте РФ № 2225420, выданном по заявке от 19.06.2003 г. предлагается состав и способ изготовления электропроводной эластомерной композиции для заземляющих электродов, обеспечивающих снижение импеданса по тому же принципу. В патенте РФ № 2181918 от 20.06.2000 г. предлагается при изготовлении заземлителей для условий вечной мерзлоты закла-

дывать заземлитель в тонкий проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением 10–100 Ом·м, толщиной 0,1–5 м, находящийся в многолетнемерзлом грунте на глубине от 3,5 до 20 м и сохраняющий низкое сопротивление круглогодично. Этот слой предварительно локализуется методами электроразведки. Очевидно, что это такая же идея, но с использованием доступных природных возможностей. В патенте РФ № 2476622 от 06.07.2011 г. предлагается заземлители собирать в виде гирлянды электродов с помощью специальных токопроводящих приспособлений.

Тем не менее, работа [6] представляется важной, поскольку предложенные идеи рассмотрены теоретически, просчитаны количественно и проверены в эксперименте, в том числе натурном. Авторы работы [6] отмечают, что за счет различных приемов смогли уменьшить сопротивление заземления до величины 9,75 Ом.

Следует обратить внимание на разницу в электропроводности среды в выполненном нами исследовании и в случае, описанном в [6], а также на отсутствие промежуточного геля с электропроводностью 2 См/м между электродом и грунтом. Для электрода из нержавеющей стали диаметром 2 см в глине с измеренным значением удельной электропроводности 0,005 См/м расчетное значение сопротивления составляет 104 Ом. Поскольку измеренное значение импеданса между трубками составило 72 Ом, следует предположить, что реальная электропроводность глины, в которую вбиты трубки, была выше, чем электропроводность измеренной нами глины, из-за большого количества влаги, и составляла 0,015 См/м.

Можно предположить, что эти отличия электропроводности носят локальный характер: влага течет вдоль границы почва-металл. Из-за этого протекания воды глина вблизи контакта становится более влажной и более проводящей, чем глина, которая взята для измерений электропроводности.

Возможен также более интересный эффект: втягивание более проводящих жидкостей в зону сгущения силовых линий. Этот эффект не зависит от направления тока и

должен наблюдаться как для постоянного тока, так и для переменного. Нержавеющие трубки были вбиты в землю более года назад. За это время они в какой-то степени выполняли функции громоотвода, пропускающая через себя атмосферное электричество. Соответственно растворы солей из почвы должны были смещаться в сторону сгущения силовых линий, т. е. к электродам, тем самым увеличивая их эффективный диаметр.

В работе [6] сопротивление электродов длиной 1,2 м и диаметром 7 см без геля составляло 18,7 Ом при электропроводности 0,05 См/м, т. е. в 10 раз выше. Если мы приведем измеренное нами сопротивление к электропроводности 0,05 Ом, то получится 10,4 Ом, что с учетом разницы в размерах и влияния поверхности примерно соответствует данным статьи [6]. Таким образом, если все приемы, рекомендованные в [6], применить при разворачивании диполя из углеродного материала, то мы вполне можем добиться сходных результатов, не используя тяжелые, громоздкие, дорогие стальные трубы.

Можно назвать много причин, по которым использование тканей, шнуров и волокон из углеродных материалов для изготовления электродов-заземлителей представляется очень перспективным.

Углеродные материалы не подвержены химической коррозии, разрушающему действию бактерий и грибов. Это экологически чистый материал: он не загрязняет почву ионами тяжелых металлов. Это очень легкие материалы: шнурок диаметром 6 мм и длиной 420 см весит всего 73 г, тогда как двухметровая трубка из нержавеющей стали диаметром 2 см весит около 2 кг. Углеродный шнур или ленту можно быстро и легко разложить на поверхности земли, причем его можно положить по месту на неровном основании без дополнительных бурений и земляных работ. Это прочный материал: его можно опускать в колодцы и шахты на большую глубину, используя как прочный трос для закрепления грузов и даже для аварийного спуска или подъема людей. Ткани, ленты



и шнуры из углеродных волокон обладают сильно выраженными капиллярными свойствами: они хорошо впитывают и долго удерживают влагу, что полезно для обеспечения хорошего электрического контакта с грунтом.

Одной из основных рекомендаций, данных в статье [6], является рекомендация использования комплексных электродов, составленных из нескольких элементов, например, из четырех металлических труб, соединенных электрически. Наши эксперименты показывают, что еще эффективнее использовать структуры, напоминающие корни дерева, со множеством разветвлений и развитой поверхностью [2]. На базе углеродных лент и шнуров такие структуры можно легко и быстро изготовить с учетом специфики местных условий. При этом электрический контакт между составными элементами обеспечивается простым связыванием в узлы шнуров или лент. Применение материалов из углеродных волокон и изготовление структур, напоминающих корни дерева, будет способствовать удержанию влаги непосредственно вблизи электродов, т. е. в областях, наиболее влияющих на общий импеданс антенны.

В частности, показано, что на одном и том же участке земли углеродный шнур диаметром 6 мм, выложенный под прямым углом со сторонами по 2 м на поверхности земли и слегка присыпанный грунтом, дает

такое же сопротивление, как электрод из нержавеющей стали в виде трубы с внешним диаметром 2 см, вбитой в землю на глубину 1,5 м. Если же рядом со шнуром положить ленту из углеродной ткани шириной 10 см и такой же длины, то сопротивление падает в 1,5 раза, т. е. сопротивление такого комбинированного углеродного электрода заметно ниже, чем сопротивление указанных нержавеющих труб.

Все это делает возможным разработку легких, носимых аварийных комплектов, которые можно быстро развернуть на месте в случае обвала грунта или взрыва в шахте или при организации спасательных работ в пещере. При многих авариях зона завала может быть заметно меньше, чем глубина шахты, и легкое аварийное устройство может оказаться эффективным для связи потерпевших с группой спасателей.

До сих пор разработчики материалов из углеродных волокон обращали основное внимание не на их электрические характеристики, а на проблемы механической прочности при малом весе, ориентируясь на заказы космической и авиационной промышленности. Однако в случае осознания практической значимости снижения сопротивления тканых углеродных материалов и проведения соответствующих исследований можно ожидать, что промышленность освоит выпуск углеродных материалов с заметно лучшими проводящими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олышанский В.М. Бионическое моделирование электросистем слабозлектрических рыб. М.: Наука, 1990. 208 с.
2. Сюэ Вэй, Олышанский В.М., Волков С.В. Импедансные характеристики заземлителей // Коррозия, материалы, защита. 2016. № 12. С. 9–21.
3. Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Earth Impedance Model for Through-the-Earth Communication Applications with Electrodes // Radio Science. 2010. Vol. 45. No. 6. Pp. 2970–2980. Article ID RS6015.
4. Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Improving Medium Access in Through-the-Earth VLF-LF Communications // Journal of Communications. 2009. Vol. 4. No. 4. Pp. 284–294.
5. Bataller V., Muñoz A., Molina Gaudro P., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Electrode Impedance Measurement in Through-the-Earth Communication Applications // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2011. DOI: 10.1049/iet-map.2010.0312.
6. Yidong Xu, Lili Guo, Wei Xue, Korochentsev V., Junwei Qi An Optimal Electric Dipole Antenna Model and Its Field Propagation // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8601497>

REFERENCES

1. Olshanskiy V.M. *Bionicheskoye modelirovaniye elektrosistem slaboelektricheskikh ryb*. Moscow: Nauka Publ., 1990, 208 p. (rus)
2. Xue Wei, Olshanskiy V.M., Volkov S.V. Impedansnyye kharakteristiki zazemlitley [Impedance Characteristics of Grounding Conductors]. *Korroziya, materialy, zashchita*, 2016, No. 12, Pp. 9–21. (rus)
3. Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Earth Impedance Model for Through-the-Earth Communication Applications with Electrodes. *Radio Science*, 2010, Vol. 45, No. 6, Pp. 2970–2980, Article ID RS6015.
4. Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Improving Medium Access in Through-the-Earth VLF-LF Communications. *Journal of Communications*, 2009, Vol. 4, No. 4, Pp. 284–294.
5. Bataller V., Muñoz A., Molina Gaudó P., Mediano A., Cuchí J.A., Villarroel J.L. Electrode Impedance Measurement in Through-the-Earth Communication Applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, DOI: 10.1049/iet-map.2010.0312.
6. Yidong Xu, Lili Guo, Wei Xue, Korochentsev V., Junwei Qi An Optimal Electric Dipole Antenna Model and Its Field Propagation. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8601497>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ВЭЙ Сюэ

WEI X.

E-mail: weihe@mail.ru

ОЛЬШАНСКИЙ Владимир Менделевич

OL'SHANSKIY Vladimir M.

E-mail: vmolsh@yandex.ru

ВОЛКОВ Сергей Васильевич

VOLKOV Sergey V.

E-mail: mendur@mail.ru

БОГАЧЕВ Евгений Акимович

BOGACHEV Evgeniy A.

E-mail: Eug-bogatchev@mail.ru

ВОЛБЕНКО Сергей Валентинович

VOLVENKO Sergey V.

E-mail: volk@cee.spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017



Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.18721/JCSTCS.10104

УДК 004.832.32

ЭФФЕКТИВНАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБРАТНОГО МЕТОДА МАСЛОВА ДЛЯ ИНТУИЦИОНИСТСКОЙ ЛОГИКИ

В.А. Павлов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изложены результаты исследования, посвящённого применению обратного метода Маслова для автоматизации логического вывода в интуиционистских логических исчислениях. Подробно рассмотрены адаптированные стратегии поиска вывода для интуиционистских исчислений обратного метода, а также новые стратегии, позволяющие ограничить возникающие переборы и уменьшить размер пространства поиска вывода. Также описаны детали реализации разработанной автором компьютерной программы WhaleProver, использующей обратный метод для логического вывода в интуиционистской логике первого порядка. Приведены результаты экспериментального сравнения предложенных стратегий друг с другом и новые результаты сравнения программы WhaleProver с существующими аналогами. Программа не уступает в эффективности лучшим из существующих аналогов (ileanCoP, Imogen) и даже позволяет решить новые задачи из библиотеки ILTP. Таким образом, на практике подтверждается, что программная реализация обратного метода может быть не менее эффективной, чем реализации других методов автоматического логического вывода (в частности, табличных методов).

Ключевые слова: автоматическое доказательство теорем; логический вывод; обратный метод; метод Маслова; интуиционистская логика.

EFFICIENT IMPLEMENTATION OF THE INVERSE METHOD FOR FIRST-ORDER INTUITIONISTIC LOGIC

V.A. Pavlov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

This paper contains the results of the research related to Maslov's inverse method and its application to first-order intuitionistic logic. Several proof search strategies for the inverse-method intuitionistic calculus, which allow reducing the proof search space and avoiding redundant inferences, are proposed and explained in detail. Some strategies are new, others are adapted variants of the existing strategies for classical logic. This article includes a detailed description of the automated theorem-proving system WhaleProver for first-order intuitionistic logic, which is based on the inverse method. This article also describes the experimental comparison of the proposed proof search strategies and comparison of WhaleProver with other first-order intuitionistic logic provers. For problems from the ILTP benchmark library, WhaleProver shows comparable results with state-of-the-art intuitionistic provers (ileanCoP, Imogen). Moreover, WhaleProver

solves new problems from ILTP, in comparison with all other provers. The results of the study show that inverse method implementation can be at least as efficient as state-of-the-art implementations of other theorem-proving methods (e.g., tableaux methods).

Keywords: automated theorem proving; sequent calculus; inverse method; intuitionistic logic; ILTP.

Сегодня системы *автоматического доказательства теорем (АДТ)* успешно применяются при решении ряда научных и технических задач, которые традиционно считаются интеллектуальными: доказательство математических теорем, верификация аппаратного, программного обеспечения и сетевых протоколов, синтез ПО и т. д.

В интерактивных системах АДТ («proof assistants»), таких как Coq, Agda и Nuprl, важную роль играют конструктивные теории [14], позволяющие из доказательства существования некоторого объекта извлечь его построение. Одной из таких теорий является *интуиционистская логика* первого порядка, в которой стандартные пропозициональные связки и кванторы интерпретируются отличным от классической логики образом. Так, в интуиционистском случае из доказательства $\exists x P(x)$ можно извлечь конкретный пример $x = a$ и доказательство соответствующего утверждения $P(a)$. В интуиционистской логике неприемлемы классические законы исключённого третьего $A \vee \neg A$ и снятия двойного отрицания $(\neg\neg A) \supset A$.

С помощью программ Coq и Nuprl можно решать сложные задачи за счёт механизма тактик, включающих автоматизированные тактики для интуиционистской логики первого порядка. Например, автоматизированная система АДТ JProver [26] встроена в Coq, Nuprl и MetaPRL. Однако существующие интуиционистские тактики трудно назвать очень эффективными (см. результаты программы JProver на задачах из ILTP [29]).

Целью работы, результаты которой излагаются в настоящей статье, является разработка автоматизированной системы АДТ, позволяющей решать новые задачи по сравнению с JProver и с другими известными системами АДТ для интуиционистской логики первого порядка. Для апробации и оценки эффективности про-

граммы используется библиотека ILTP [25, 29], которая содержит обширную коллекцию задач (более 2500) для тестирования и сравнения систем АДТ для интуиционистской логики.

Для решения поставленной задачи был выбран обратный метод Маслова [4] (см. также [15, 22] и дополнение к [13]). Основные особенности этого метода логического вывода — поиск вывода в направлении «сверху вниз», т. е. от аксиом к конечной гипотезе, и использование *свойства подформульности* логических исчислений для ограничения числа аксиом.

Для реализации эффективного алгоритма поиска вывода на основе обратного метода необходимо использовать стратегии поиска вывода. Различные стратегии для обратного метода рассмотрены в работах [5–7, 11, 15, 20, 21, 28, 30]. Более подробный обзор литературы можно найти в статьях [12, 15, 18].

Далее рассматривается новое исчисление обратного метода $\mathbf{IM}_{\text{inv}}^{\xi}$, описывается, как для этого исчисления и исчисления $\mathbf{I}_{\text{inv}}^{\xi}$ из [15] можно адаптировать стратегии, предложенные разными авторами для других исчислений обратного метода, предлагаются новые стратегии. Рассматривается пример доказательства теоремы обратным методом, описываются результаты экспериментов с разработанной программной реализацией обратного метода для интуиционистской логики.

Предполагается знакомство читателя с математической логикой и основами теории доказательств [3, 9, 13]. С результатами предыдущих этапов данной работы можно ознакомиться в статьях [12, 24].

Основные определения и используемые обозначения

В статье используется стандартный язык логики первого порядка, с символами логических операций $\neg, \vee, \wedge, \supset$; кванторами

$\forall$ и $\exists$; предикатными символами P, Q, R ; переменными x, y, z и т. д.; символами для произвольных термов r, s, t ; символами для произвольных формул A, B, C и т. д.

В данном разделе стандартные определения опускаются, более подробное изложение терминологии см. в [12].

Мультимножество — обобщение понятия множества, допускающее включение нескольких экземпляров одного и того же элемента. Определяется однозначно с точностью до порядка следования формул.

Произвольные мультимножества (возможно, пустые) обозначаются буквами Γ и Δ (возможно, с подстрочными индексами или со штрихами). Запись вида Γ, Δ (или Γ, A) обозначает мультимножество, получающееся объединением элементов Γ с элементами Δ (соответственно с формулой A).

Под **выражением** в данной работе понимается терм, формула, подстановка, мультимножество формул, секвенция и т. д.

Запись $var(E)$ обозначает множество всех переменных выражения E , а $free(E)$ — множество всех его свободных переменных.

Для подстановки $\theta = \{x_1/t_1, \dots, x_n/t_n\}$ запись $dom(\theta)$ обозначает множество переменных $\{x_1, \dots, x_n\}$, а $ran(\theta)$ — множество всех переменных, входящих в термы $t_1, \dots, t_n$. Символ ε обозначает пустую подстановку.

Сужение подстановки $\theta = \{x_1/t_1, \dots, x_n/t_n\}$ на множество переменных Ω — это подстановка, обозначаемая как $\theta|_{\Omega}$ и содержащая те и только те пары x_i/t_i из θ , для которых $x_i \in \Omega$. Запись θ_{-x} обозначает подстановку $\theta|_{dom(\theta) \setminus \{x\}}$.

Если E — выражение и θ — подстановка, допустимая для E , то запись $E\theta$ является сокращением для $E(\theta|_{free(E)})$.

Переименование — это подстановка, представляющая собой отображение один к одному из своей области определения в неё же.

Наиболее общий унификатор подстановок σ_1 и σ_2 — это наиболее общий унификатор упорядоченных наборов $(x_1\sigma_1, \dots, x_n\sigma_1)$ и $(x_1\sigma_2, \dots, x_n\sigma_2)$, где $\{x_1, \dots, x_n\} = dom(\sigma_1) \cup dom(\sigma_2)$.

Вхождения подформулы¹ в формулу F и **полярности** этих вхождений определяются стандартным образом (см., например [4, с. 31]).

Типы вхождений связок и кванторов в формулу определяются так же, как и в статье [10]. Пусть символ $\odot$ обозначает любой из символов $\neg, \wedge, \vee, \supset, \forall$ и $\exists$. Вхождение символа $\odot$ в формулу F будем называть вхождением типа $\odot^+$ (типа $\odot^-$), если оно является положительным (соответственно отрицательным) вхождением в F .

Очищенная формула — формула F , в которой все кванторы связывают разные переменные и ни одна связанная переменная не входит свободно в F .

Соглашение 1. В дальнейшем изложении ξ обозначает замкнутую очищенную формулу логики первого порядка, которая содержит только связки $\neg, \wedge, \vee, \supset$ и кванторы $\forall$ и $\exists$ ².

Определяемые ниже понятия зависят от конкретной формулы ξ , поэтому в названиях терминов явно указан символ ξ ³.

ξ -атом — это вхождение атомарной подформулы в ξ .

ξ -секвенция — это секвенция специального вида: $A_1\sigma_1, \dots, A_n\sigma_n \vdash B_1\delta_1, \dots, B_m\delta_m$, где $A_i, i \in \{1, \dots, n\}$ — отрицательные вхождения подформулы в ξ ; $B_j, j \in \{1, \dots, m\}$ — положительные вхождения подформулы в ξ ; $\sigma_i, i \in \{1, \dots, n\}$ и $\delta_j, j \in \{1, \dots, m\}$ — подстановки произвольных термов вместо переменных. В статье термин «секвенция» может использоваться вместо термина « ξ -секвенция», если тип секвенции понятен из контекста.

¹ В предыдущих статьях [12] и [24] вместо понятия вхождения подформулы использовалось понятие свободной подформулы, как в [15]. Однако впоследствии выяснилось, что изложение в терминах вхождений подформулы является более корректным, а также позволяет избежать ряда типичных ошибок.

² Произвольную замкнутую формулу нетрудно привести к указанному виду.

³ Таким образом, используется стиль наименования терминов, характерный для работ С.Ю. Маслова.

Сами формулы вида $\psi \cdot \sigma$, где ψ — вхождение подформулы в ξ , а σ — подстановка, будем называть ξ -формулами. Таким образом, антецедент и сукцедент ξ -секвенции представляют собой мультимножества ξ -формул.

Пусть $S = A_1\sigma_1, \dots, A_n\sigma_n \vdash B_1\delta_1, \dots, B_m\delta_m$ — ξ -секвенция. Тогда запись вида $S\theta$, где θ — подстановка, обозначает ξ -секвенцию $A_1(\sigma_1\theta), \dots, A_n(\sigma_n\theta) \vdash B_1(\delta_1\theta), \dots, B_m(\delta_m\theta)$, а запись $free(S)$ обозначает множество свободных переменных ξ -секвенции S : $free(A_1\sigma_1) \cup \dots \cup free(A_n\sigma_n) \cup free(B_1\delta_1) \cup \dots \cup free(B_m\delta_m)$.

Запись $norm(S)$ обозначает нормальную

форму ξ -секвенции S , которая получается из S сужением областей определения всех входящих в неё подстановок: каждая ξ -формула $\psi \cdot \sigma$ заменяется ξ -формулой $\psi \sigma|_{free(\psi)}$.

Пусть S и S' — ξ -секвенции, $norm(S) = (\Gamma \vdash \Delta)$ и $norm(S') = (\Gamma' \vdash \Delta')$. Тогда запись $S \subseteq S'$ означает, что $\Gamma \subseteq \Gamma'$ и $\Delta \subseteq \Delta'$. В этом случае будем говорить, что S является подсеквенцией S' .

ξ -формула $\psi \cdot \sigma$ называется правильной, если $dom(\sigma) = free(\psi)$ и $vran(\sigma) \cap var(\xi) = \emptyset$. ξ -секвенция S называется правильной, если каждая входящая в неё ξ -формула является правильной.

Таблица 1

Исчисление IM_{inv}^ξ

$P_1 \cdot \rho_1 \tau \vdash P_2 \cdot \rho_2 \tau$	(Px)		
$\frac{\Gamma, A_1 \cdot \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, A_1 \wedge A_2 \cdot \sigma \vdash \Delta}$	$(L \wedge_1)$	$\frac{\Gamma, A_2 \cdot \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, A_1 \wedge A_2 \cdot \sigma \vdash \Delta}$	$(L \wedge_2)$
$\frac{\Gamma_1 \vdash \Delta_1, A_1 \cdot \sigma_1 \quad \Gamma_2 \vdash \Delta_2, A_2 \cdot \sigma_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta, A_1 \wedge A_2 \cdot \sigma_1 \theta}$	$(R \wedge)$	$\frac{\Gamma_1, A_1 \cdot \sigma_1 \vdash \Delta_1 \quad \Gamma_2, A_2 \cdot \sigma_2 \vdash \Delta_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta, A_1 \vee A_2 \cdot \sigma_1 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta}$	$(L \vee)$
$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A_1 \cdot \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, A_1 \vee A_2 \cdot \sigma}$	$(R \vee_1)$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A_2 \cdot \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, A_1 \vee A_2 \cdot \sigma}$	$(R \vee_2)$
$\frac{\Gamma_1 \vdash \Delta_1, A_1 \cdot \sigma_1 \quad \Gamma_2, A_2 \cdot \sigma_2 \vdash \Delta_2}{\Gamma_1 \theta, \Gamma_2 \theta, A_1 \supset A_2 \cdot \sigma_1 \theta \vdash \Delta_1 \theta, \Delta_2 \theta}$	$(L \supset)$	$\frac{\Gamma, A_1 \cdot \sigma \vdash}{\Gamma \vdash A_1 \supset A_2 \cdot \sigma}$	$(R \supset_1)$
$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A_2 \cdot \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, A_1 \supset A_2 \cdot \sigma}$	$(R \supset_2)$	$\frac{\Gamma, A_1 \cdot \sigma_1 \vdash A_1 \supset A_2 \cdot \sigma_2}{\Gamma \theta \vdash A_1 \supset A_2 \cdot \sigma_2 \theta}$	$(R \supset_3)$
$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \cdot \sigma}{\Gamma, \neg A \cdot \sigma \vdash \Delta}$	$(L \neg)$	$\frac{\Gamma, A \cdot \sigma \vdash}{\Gamma \vdash \neg A \cdot \sigma}$	$(R \neg)$
$\frac{\Gamma, A \cdot \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, \forall x A \cdot \sigma_{-x} \vdash \Delta}$	$(L \forall)$	$\frac{\Gamma \vdash A \cdot \sigma}{\Gamma \vdash \forall x A \cdot \sigma_{-x}}$	$(R \forall)$
$\frac{\Gamma, A \cdot \sigma \vdash \Delta}{\Gamma, \exists x A \cdot \sigma_{-x} \vdash \Delta}$	$(L \exists)$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \cdot \sigma}{\Gamma \vdash \Delta, \exists x A \cdot \sigma_{-x}}$	$(R \exists)$
$\frac{\Gamma, A \cdot \sigma_1, A \cdot \sigma_2 \vdash \Delta}{\Gamma \theta, A \cdot \sigma_1 \theta \vdash \Delta \theta}$	(LC)	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, A \cdot \sigma_1, A \cdot \sigma_2}{\Gamma \theta \vdash \Delta \theta, A \cdot \sigma_1 \theta}$	(RC)
$\frac{S}{S\rho}$	(Rn)	$\frac{S}{norm(S)}$	(Nrm)

Исчисление обратного метода для интуиционистской логики

Секвенциальное исчисление $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ строится индивидуально для каждой доказываемой формулы ξ . Аксиомы и правила вывода исчисления представлены в табл. 1. Во всех правилах, кроме (Rn) и (Nrm) , посылки являются правильными ξ -секвенциями и не имеют общих свободных переменных друг с другом. В схеме аксиом (Px) : P_1, P_2 — ξ -атомы; ρ_1, ρ_2 — такие переименования, что $free(P_1\rho_1) \cap free(P_2\rho_2) = \emptyset$; τ — наиболее общий унификатор формул $P_1\rho_1$ и $P_2\rho_2$. Подстановка θ — наиболее общий унификатор подстановок σ_1 и σ_2 . В правиле (Rn) S — это ξ -секвенция, а ρ — переименование. В правиле (Nrm) S — ξ -секвенция. В правилах $(L\exists)$ и $(R\forall)$ должно выполняться *ограничение на собственную переменную*: $x\sigma$ — это переменная, которая не входит свободно в заключение.

Структурные правила (LC) и (RC) называются *правилами сокращения*, или просто *сокращением*. Структурные правила (Rn) и (Nrm) называются *правилами переименования* и *нормализации* соответственно. Само исчисление получено с помощью стандартной методики из [8, 15].

Будем говорить, что формула ξ выводима в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ или $\mathbf{I}_{inv}^\xi$, если в этом исчислении выводима секвенция $(\vdash \xi \cdot \epsilon)$.

Из любой ξ -секвенции в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ можно получить правильную ξ -секвенцию применением правил (Rn) и (Nrm) , которые мы будем называть *дополнительными правилами* исчисления. Все остальные правила вывода и схему аксиом (Px) будем называть *основными правилами*.

Пусть S — правильная ξ -секвенция, а Π — вывод S в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$. Π будем называть *правильным выводом*, если выполняются условия:

- применение правила (Rn) входит в Π только непосредственно после применения основных правил, применение правила (Nrm) — только непосредственно после применения правила (Rn) , а применение основных правил (кроме аксиом) — только непосредственно после применения правила (Nrm) ;

- если $(S_1/S_1\rho_1)$ и $(S_2/S_2\rho_2)$ — два различных применения правила (Rn) в Π , то множества $free(S_1\rho_1)$ и $free(S_2\rho_2)$ не имеют общих переменных как друг с другом, так и с множеством $var(\xi)$.

Использование правильных выводов обусловлено следующими двумя соображениями. Во-первых, это позволяет гарантировать соблюдение условий на посылки применения основных правил (см. выше). Во-вторых, исключается возможность повторного применения правил (Rn) и (Nrm) .

Лемма 1. Любой вывод произвольной ξ -секвенции S в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ можно перестроить, сохраняя порядок применения основных правил, в правильный вывод (правильной) ξ -секвенции S' , совпадающей с S с точностью до переименования свободных переменных.

▷ Указанное перестроение можно выполнить, добавляя, где нужно, применение правил (Rn) и (Nrm) , при необходимости заменяя такое применение этих правил, которое не удовлетворяет условиям из определения правильного вывода, а также удаляя «лишнее» применение. ◁

Следствие. Вывод формулы ξ в $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ можно перестроить в правильный вывод этой формулы, сохраняя порядок применения основных правил.

Лемма 2. Правильный вывод в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ обладает свойством чистоты переменных⁴.

▷ Следует из соглашения 1 и определения правильного вывода. ◁

Следующая теорема утверждает равнообъёмность исчисления $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ и исчисления $\mathbf{GNPC}$ из статьи А.Г. Драгалина [1].

Теорема 1. Пусть ξ замкнутая формула, соответствующая соглашению 1, а ξ' получается из ξ заменой каждого вхождения подформулы вида $\neg A$ формулой $A \supset \perp$. ξ -секвенция $(\vdash \xi \cdot \epsilon)$ выводима в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ тогда и только тогда, когда секвенция $(\vdash \xi')$ выводима в $\mathbf{GNPC}$.

▷ Доказательство строится аналогично приведённому в [15] доказательству полно-

⁴ Определение доказательства с чистыми переменными см. в [2] или в [3, § 55].

ты и непротиворечивости исчисления $\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$. $\triangleleft$

Стратегии поиска вывода

Дополним исчисление $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ стратегиями поиска вывода, которые позволят избавиться от ряда избыточных секвенций и применения правил вывода. Одновременно будем рассматривать возможность применения стратегий к исчислению $\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$ из [15], в котором секвенции содержат не более одной формулы в сукцеденте.

Стратегию X будем называть *полной* для секвенциального исчисления Y , если применение стратегии X не приводит к уменьшению множества выводимых в этом исчислении секвенций.

Пусть S и S' — ξ -секвенции. Будем говорить, что S' *поглощает* S ($S \prec S'$), если существует такая подстановка σ , что $S'\sigma \subseteq S$.

Стратегия поглощения для $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ ($\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$) определяется стандартным образом: если в процессе поиска вывода получены две такие секвенции S_1 и S_2 , что S_1 поглощает S_2 , то секвенцию S_2 разрешается удалить.

Т е о р е м а 2. Стратегия поглощения является полной для $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ и $\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$.

▷ Индукцией по построению вывода можно показать⁵, что если $S_1 \prec S_2$ и существует вывод формулы ξ из секвенций $S_1, S_2, \dots, S_k$, то также существует вывод ξ из $S_2, \dots, S_k$. $\triangleleft$

Теперь рассмотрим некоторые возможности перестановки применения правил в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$. Будем использовать терминологию из статьи С. Клини [2]. Будем говорить, что применение правила R_1 *непосредственно предшествует* применению правила R_2 , если между ними расположено разве лишь применение структурных правил. При этом такое применение правил R_1 и R_2 будем называть *смежным*.

Пусть список $\mathfrak{R}^{\xi}$ состоит из следующих правил исчисления $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$: $(L \wedge_1)$, $(L \wedge_2)$, $(R \vee_1)$, $(R \vee_2)$, $(L \neg)$, $(R \supset_2)$, $(L \forall)$, $(R \exists)$ и $(L \exists)$, а также $(R \forall)$ в случае, если ξ не содержит отрицательных вхождений символа $\vee$.

Лемма 3. Рассмотрим вывод Π в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$, обладающий свойством чистоты переменных, и в нём два смежных применения правил R_1 и R_2 (R_1 расположено над R_2), принадлежащие различным вхождениям формул в заключение R_2 . Тогда если правило R_2 входит в список $\mathfrak{R}^{\xi}$, то эти два применения можно переставить (с сохранением свойства чистоты переменных), за исключением случаев: $(L \forall) / (L \exists)$, $(R \exists) / (L \exists)$ и $(L \forall) / (R \forall)$.

В указанных трёх случаях перестановку всё же можно выполнить при условии, что собственная переменная $x\sigma$ применения правила R_2 не входит в терм $x\sigma$ применения правила R_1 .

▷ Перестановочность правил удобно сначала доказать для промежуточного исчисления без унификации $\mathbf{IM}_{inv}$ (это исчисление в статье не приводится, но его правила нетрудно восстановить по правилам исчисления $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$, см. для примера [15]). Затем этот результат переносится на исчисление $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$, за счёт эквивалентности выводов в исчислениях $\mathbf{IM}_{inv}$ и $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ с точностью до применения структурных правил.

Для $\mathbf{IM}_{inv}$ лемма доказывается аналогично лемме 7 из статьи [2]. Основное отличие возникает при рассмотрении правила $(R \supset_2)$, которое можно поднимать над применением правил $(L \neg)$ и $(L \supset)$, т. к. в этом правиле не накладывается ограничение на число формул в сукцеденте. $\triangleleft$

Теорема 3. Произвольный вывод Π формулы ξ в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ можно перестроить (без нарушения свойства чистоты переменных, если оно имелось), поднимая вверх любое применение правила R из списка $\mathfrak{R}^{\xi}$ так, чтобы оно входило в новый вывод только в следующих случаях:

- 1) применению R непосредственно предшествует применение аксиомы;
- 2) боковая формула применения правила R вводится непосредственно предшествующим ему применением неструктурного правила вывода;
- 3) пара R'/R , где применение правила R' непосредственно предшествует применению R , совпадает с $(L \forall) / (L \exists)$, $(R \exists) / (L \exists)$ или $(L \forall) / (R \forall)$, или причём терм $x\sigma$ при-

⁵ См. доказательства теорем 2 и 3 из [30].

менения правила R' содержит собственную переменную применения правила R .

▷ Не умаляя общности, можно считать, что Π обладает свойством чистоты переменных (иначе переименуем входящие в вывод переменные, см. [3, § 55]). Тогда можно применять лемму 3. Доказательство несущественно отличается от доказательства теоремы 2 из статьи [2]. ◁

Лемма 4. В условиях теоремы 3 вывод Π можно перестроить так, чтобы каждое применение правила R , совпадающего с $(L\exists)$ или $(R\forall)$ из списка $\mathcal{R}^\xi$, входило в новый вывод только таким образом, чтобы нигде выше это правило было неприменимо (за исключением применения правила $(R\forall)$, боковой формулой которого является формула вида $(A \supset B) \cdot \sigma$). Свойство чистоты переменных можно сохранить, если оно имелось.

Лемма 4 открывает дополнительные возможности подъёма применения правил $(L\exists)$ и $(R\forall)$, однако это уже не перестановка по Клини, т. к. может потребоваться удвоение применения правила $(L\exists)$, если оно поднимается над применением двухпочечных правил.

Из теоремы 3 и леммы 4 следует полнота стратегии упрощения, которая заключается в следующем. Если в процессе поиска вывода получена секвенция S , к которой применимо какое-либо правило R из списка $\mathcal{R}^\xi$, то S заменяется секвенцией, стоящей в заключении правила R (будем говорить, что S упрощается), кроме случая, когда боковой формулой применения R является формула вида $(A \supset B) \cdot \sigma$ и R является одним из правил $(R\vee_1)$, $(R\vee_2)$, $(L\neg)$, $(R\supset_2)$, $(R\exists)$ или $(R\forall)$. После каждой такой замены к новой секвенции применяются правила переименования и нормализации таким образом, как указано в определении правильного вывода. Так секвенцию S можно упрощать до тех пор, пока не получим секвенцию S' , которую далее не упростить. Такую секвенцию S' будем называть *упрощением* секвенции S .

Для исчисления I_{inv}^ξ из [15] применима аналогичная стратегия, которая в статье Т. Таммета [28] названа «reduction strategy». Для классической логики вариант такой же

стратегии сформулировал А. Воронков [30].

Теорема 4. Стратегия упрощения является полной для IM_{inv}^ξ и I_{inv}^ξ .

▷ Для исчисления IM_{inv}^ξ следует из теоремы 3 и леммы 4. Для I_{inv}^ξ можно доказать аналогичную теорему о перестановочности применения правил. ◁

Рассмотрим следующую стратегию удаления секвенций с недопустимыми подстановками (УСНП) для исчислений IM_{inv}^ξ и I_{inv}^ξ . Эта стратегия включает три множества секвенций U_subs_1 , U_subs_2 и U_subs_3 , соответствующие частным случаям недопустимых систем зависимостей [4], [11], которые можно достаточно быстро идентифицировать.

Будем называть переменную $x \in var(\xi)$ *параметром* ξ , если x связана квантором типа $\forall^+$ или $\exists^-$.

U_subs_1 состоит из секвенций, содержащих такие ξ -формулы $\psi_1 \cdot \sigma_1$ и $\psi_2 \cdot \sigma_2$ (не обязательно различные), что $\exists x_1 \in free(\psi_1), x_2 \in free(\psi_2), x_1 \neq x_2 : x_1\sigma_1 = x_2\sigma_2$ и $x_i, i \in \{1, 2\}$ — параметр ξ .

Множество U_subs_2 состоит из секвенций, содержащих такую формулу $\psi \cdot \sigma$, что $\exists x \in free(\psi) : x$ — параметр ξ и $x\sigma$ не является переменной, т. е. является предметной константой или составным термом вида $f(t_1, \dots, t_n)$.

Пусть x — параметр ξ и $x' \in var(\xi)$. Переменная x *зависима* от x' , если $x \neq x'$ и квантор, связывающий x , находится в зоне действия квантора, связывающего x' . Для секвенции S и переменных $y, y' \in free(S)$ запись $y < y'$ означает, что существует ξ -формула $\psi \cdot \sigma$, входящая в S , и такие переменные $x, x' \in free(\psi)$, что x — параметр ξ , x зависима от x' , $x\sigma = y$ и $x'\sigma = y'$.

Множество U_subs_3 состоит из секвенций S , для которых существует такая цепочка переменных $y_1, y_2, \dots, y_k \in free(S), k \geq 1$, что $y_1 < y_2 < \dots < y_k < y_1$.

Вхождение подформулы ψ в формулу ξ будем называть *строгим положительным*⁶, если оно является положительным вхождением в ξ и не принадлежит никакому отри-

⁶ В статье [10] используется термин «существенно положительное вхождение».

цательному вхождению подформулы в ξ .

Пусть ψ и ψ' — вхождения подформул в ξ . Тогда запись $\psi \in \psi'$ означает, что ψ принадлежит ψ' . Будем говорить, что ψ критическим образом принадлежит ψ' и писать $\psi \in \psi'$, если $\psi \in \psi'$ и существует такое положительное вхождение в ξ подформулы ψ'' вида $A \supset B$, $\neg A$ или $\forall x A$, что $\psi'' \in \psi'$ и $\psi \in A$.

Теперь рассмотрим новую стратегию удаления секвенций с недопустимыми формулами (стратегия УСНФ) для исчислений $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ и $\mathbf{I}_{inv}^\xi$. Эта стратегия включает два множества секвенций U_form_1 и U_form_2 .

Множество U_form_1 для $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ и $\mathbf{I}_{inv}^\xi$ определяется одинаково. Пусть $S = \xi$ -секвенция. $S \in U_form_1$, если найдётся такая пара ξ -формул $\psi_1 \cdot \sigma_1$ и $\psi_2 \cdot \sigma_2$ из S , что $\psi_2 \notin \psi_1$ (в частности, ψ_2 не совпадает с ψ_1), вхождение в ξ ближайшей общей надформулы ψ_1 и ψ_2 (обозначим его ψ^*) является строго положительным, и выполняется хотя бы одно из следующих условий:

1. ψ^* имеет вид $A \supset B$ и совпадает с ψ_2 , при этом $\psi_1 \in A$ или $\psi_1 \in B^7$;
2. ψ^* имеет вид $A \supset B$, $\psi_1 \in A$, $\psi_2 \in B$ и ψ_2 — строго положительное вхождение в ξ ;
3. ψ^* не имеет вид $A \supset B$, при этом $\psi_1 \in \psi^*$ или $\psi_2 \in \psi^*$.

Рассмотрим множество U_form_2 для $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$. $S \in U_form_2$, если найдётся такая пара ξ -формул $\psi_1 \cdot \sigma_1$ и $\psi_2 \cdot \sigma_2$ из сукцедента S , что $\psi_i \in \chi_i$, $i \in \{1, 2\}$, где χ_i — ближайшее отрицательное вхождение в ξ надформулы ψ_i , такое что $\chi_i \in \psi^*$ (если такого вхождения не существует, то χ_i совпадает с ψ^*). Как и выше, ψ^* обозначает вхождение в ξ ближайшей общей надформулы ψ_1 и ψ_2 .

Множество U_form_2 для $\mathbf{I}_{inv}^\xi$ пусто.

Можно показать, что секвенции из множеств U_form_1 и U_form_2 не могут участвовать в выводе формулы ξ в исчислениях $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ и $\mathbf{I}_{inv}^\xi$.

По аналогии с тактикой перехода к тривиальным спецификациям [7] можно предложить следующую стратегию тривиального

сокращения: если в процессе поиска вывода получена секвенция S , для которой существует такое сокращение S' , что $S \prec S'$, то S можно заменить на S' .

Заметим, что любой вывод в исчислении $\mathbf{I}_{inv}^\xi$ можно перестроить в вывод в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$. Поэтому в качестве самостоятельной стратегии для исчисления $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ можно рассматривать построение вывода формулы ξ в исчислении $\mathbf{I}_{inv}^\xi$ (со стратегиями для $\mathbf{I}_{inv}^\xi$) с последующим получением из него вывода в $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$. Такую стратегию назовём *сингулярной*⁸ стратегией.

Теорема 5. Любая комбинация следующих стратегий является полной для исчислений $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ и $\mathbf{I}_{inv}^\xi$: стратегия поглощения, стратегия упрощения, стратегии УСНП и УСНФ, стратегия тривиального сокращения.

▷ Стратегии УСНП и УСНФ совместимы с другими стратегиями, т. к. при их использовании удаляются только такие секвенции, которые не могут участвовать в выводе формулы ξ . Тривиальное сокращение представляет собой частный случай применения поглощения. Стратегии поглощения и упрощения также совместимы, поскольку отношение поглощения инвариантно относительно упрощения секвенций. ◁

Следствие. Сингулярная стратегия совместно с любой комбинацией стратегий для $\mathbf{I}_{inv}^\xi$, перечисленных в теореме 5, является полной для $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$.

Пример решения задачи из ILTP обратным методом Маслова

Поясним принцип доказательства теорем обратным методом и применение некоторых стратегий на примере задачи SYN408+1 из библиотеки ILTP версии 1.1.2. Необходимо вывести формулу:

$$\xi = (\neg \exists x P(x)) \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))).$$

⁸ Название стратегии связано с термином «сингулярная секвенция» — это секвенция, в сукцеденте которой находится не более одной формулы. Использование сингулярных секвенций может помочь сузить пространство поиска вывода.

⁷ Напомним, что запись вида $\psi \in \psi'$ означает, что ψ критическим образом принадлежит ψ' .

Будем строить вывод в исчислении $\mathbf{IM}_{inv}^\xi$ с применением стратегий, описанных выше. Начнём доказательство с применения схемы аксиом (Px) . Заметим, что формула ξ содержит только два вхождения атомарных подформул $P(x)$ и $P(y)$, первое из которых является положительным вхождением, а второе — отрицательным. Поэтому по правилу (Px) получаем единственную (с точностью до переименования переменных) аксиому:

$$\begin{array}{c} P(y) \cdot \{y / v_1\} \vdash P(x) \cdot \{x / v_1\} \\ [(Px)] \end{array}$$

В секвенции 1 v_1 — это новая переменная. К данной секвенции применима стратегия упрощения с применением правила $(R\exists)$. Поэтому заменим секвенцию 1 заключением применения этого правила:

$$\begin{array}{c} P(y) \cdot \{y / v_1\} \vdash \exists x P(x) \cdot \varepsilon \\ [(Px) + (R\exists)]. \end{array}$$

Эту секвенцию можно дальше упростить с применением правила $(L-)$:

$$\begin{array}{c} \neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon, P(y) \cdot \{y / v_1\} \vdash \\ [(Px) + (R\exists) + (L-)]. \end{array}$$

Дальнейшие упрощения секвенции 1 невозможны. Применим к этой секвенции правило $(R\supset_1)$:

$$\begin{array}{c} \neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon \vdash (P(y) \supset Q(y)) \cdot \{y / v_1\} \\ [(R\supset_1) : 1]. \end{array}$$

$$\frac{\frac{\frac{\neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon, P(y) \cdot \{y / v_1\} \vdash}{\neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon \vdash (P(y) \supset Q(y)) \cdot \{y / v_1\}}}{\neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon \vdash (\neg \exists x P(x)) \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))) \cdot \varepsilon}}{\vdash (\neg \exists x P(x)) \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))) \cdot \varepsilon}$$

Заметим, что кроме секвенций 1–4 мы могли бы вывести и некоторые другие секвенции. Например, применив к (упрощённой) секвенции 1 правило $(R\supset_1)$ с другой боковой формулой, можно получить следующую секвенцию:

$$\begin{array}{c} P(y) \cdot \{y / v_1\} \vdash (\neg \exists x P(x)) \supset \\ \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))) \cdot \varepsilon. \end{array}$$

Однако из этой секвенции нельзя вывести формулу ξ . Действительно, можно

Поскольку формула ξ не содержит отрицательных вхождений $\forall$, то правило $(R\forall)$ входит в список $\mathfrak{R}^\xi$. Но так как в сукцеденте секвенции 2 стоит формула с главным символом $\supset$, то эту секвенцию мы не можем упростить с применением $(R\forall)^9$. Поэтому получаем новую секвенцию по правилу $(R\forall)$. Ограничение на собственную переменную в данном случае выполняется: переменная v_1 не входит свободно в заключение:

$$\begin{array}{c} \neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon \vdash \forall y (P(y) \supset Q(y)) \cdot \varepsilon \\ [(R\forall) : 2]. \end{array}$$

Полученную секвенцию уже можно упростить с применением $(R\supset_2)$:

$$\begin{array}{c} \neg \exists x P(x) \cdot \varepsilon \vdash (\neg \exists x P(x)) \supset \\ \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))) \cdot \varepsilon \\ [(R\forall) + (R\supset_2) : 2]. \end{array}$$

Завершим доказательство, применив $(R\supset_3)$ к секвенции 3 (с $\theta = \varepsilon$):

$$\begin{array}{c} \vdash (\neg \exists x P(x)) \supset (\forall y (P(y) \supset Q(y))) \cdot \varepsilon \\ [(R\supset_3) : 3]. \end{array}$$

Запишем полученный вывод формулы в виде дерева вывода (в данном примере «дерево» состоит из одной ветви), содержащего «укрупнённые» применения правил, в соответствии со стратегией упрощения:

$$\begin{array}{l} (Px) + (R\exists) + (L-) \\ (R\supset_1) \\ (R\forall) + (R\supset_2) \\ (R\supset_3) \end{array}$$

заметить, что эта секвенция принадлежит множеству U_form_1 , и по стратегии УСНФ её можно удалить.

⁹ Вообще говоря, в данном случае такое упрощение допустимо, т. к. ни одна секвенция, выводимая из секвенции 2, не может содержать вхождение $P(y)$ в антецеденте. Нетрудно видоизменить соответствующее условие в стратегии упрощения, чтобы учесть такие случаи.

Программная реализация и результаты экспериментов

Автором статьи разработана программа АДТ WhaleProver для вывода формул в интуиционистских исчислениях IM_{inv}^{ξ} и I_{inv}^{ξ} , в ряде их модификаций, а также в классическом исчислении C_{inv}^{ξ} из статьи [15]. Программа написана на C++, в ней используется вариант алгоритма «given clause algorithm» [19], адаптированный для поиска выводов в исчислениях обратного метода (подробнее описание алгоритма см. в [12]).

В программе используются стратегии прямого и обратного поглощения: при прямом поглощении удаляется вновь порождённая секвенция, если она поглощается какой-либо из выведенных ранее, а при обратном поглощении удаляется одна из порождённых ранее секвенций, если она поглощается новой секвенцией.

Программа WhaleProver использовалась в ряде экспериментов на задачах из библиотеки ILTP [25] версии 1.1.2. Все эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором Intel Core i5 3.40 GHz, ОС Windows 7 и 16 Gb ОЗУ (программа запускалась на одном ядре в

32-разрядном адресном пространстве, т. е. фактический объём используемой оперативной памяти не превышал 2 Гб).

В частности, на выборке из 362 задач различной сложности проведено сравнение стратегий для исчисления IM_{inv}^{ξ} . Основные результаты представлены в табл. 2. Первый столбец содержит номера экспериментов, в следующих шести столбцах знаком «+» отмечены включённые в экспериментах стратегии, в последующих столбцах указаны результаты экспериментов (сложность вывода — это число различных секвенций в дереве вывода, а длина вывода — это число всех секвенций). В таблице стратегиям назначены сокращённые наименования: СИ — сингулярная стратегия, ТС — тривиальное сокращение, УП — стратегия упрощения, УСНП и УСНФ — как раньше (см. выше), ОП — обратное поглощение. В каждом эксперименте использовалось прямое поглощение, чтобы при любой комбинации других стратегий программа могла решить все 362 задачи.

Для расчёта значений суммарного времени работы программы каждый эксперимент повторялся 50 раз, при этом 95 % довери-

Таблица 2

Сравнение стратегий поиска вывода

Эксперимент	СИ	ТС	УП	УСНП	УСНФ	ОП	Средняя высота вывода	Средняя сложность вывода	Средняя длина вывода	Средний размер пространства поиска вывода	Суммарное время, с
1	+						19,4	34,5	85,8	1248,0	136,5
2							19,9	34,9	85,8	1242,9	170,4
3	+	+					17,3	31,5	37,0	1042,5	106,5
4	+		+				6,9	14,3	38,4	189,6	5,6
5	+			+			19,5	34,6	86,0	998,6	73,9
6	+				+		19,5	34,5	85,8	1004,8	93,5
7	+	+	+	+	+		5,2	11,3	14,0	104,4	2,3
8		+	+	+	+		5,2	11,3	13,3	106,2	2,7
9	+	+	+	+	+	+	5,3	11,4	14,0	103,2	2,8
10		+	+	+	+	+	5,2	11,4	13,3	105,2	3,1



тельный интервал не превышал $\pm 3\%$ от каждого из приведённых в таблице значений.

Эксперименты 3–6 показывают, что стратегия упрощения существенно опережает другие стратегии по основным оцениваемым критериям (время и размер пространства поиска вывода). Новая стратегия УСНФ оказалась по тем же показателям эффективнее стратегии тривиального сокращения.

Сравнение экспериментов 1 и 2, 7 и 8, 9 и 10 показывает, что сингулярная стратегия позволяет уменьшить время решения задач. Эффект от использования этой стратегии максимален, когда другие стратегии отключены, и уменьшается при включении всех остальных стратегий.

Максимальная эффективность программы достигается при включении всех стратегий (эксперимент 9) или всех, кроме обратного поглощения (эксперимент 7). При этом отключение обратного поглощения позволяет даже уменьшить время решения задач (проверка поглощения является достаточно затратной операцией).

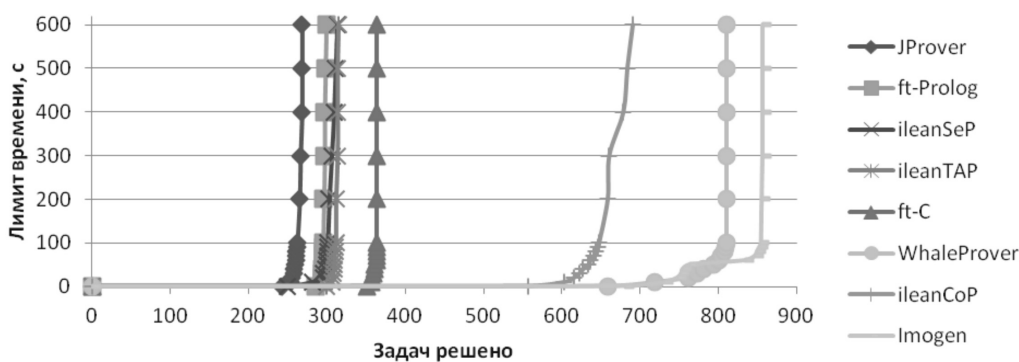
Конфигурация из эксперимента 7 с небольшими дополнительными оптимизациями использовалась при сравнении программы WhaleProver с существующими аналогами на задачах из ILTP. Программа решила 811 задач с лимитом времени 100 с на каждую, что на 183 задачи больше, чем могла решить предыдущая версия программы [12]. Для сравнения, результаты тестирования других программ АДТ для интуиционистской логики первого порядка (с лимитом времени 600 с), опубликованные на сайте ILTP [29], варьируются от 268 (JProver) до 690 (ileanCoP) решённых задач.

Существуют и более свежие независимые результаты тестирования других программ на библиотеке ILTP: программа Imogen решила 857 задач [20], программа napoCoP-i доказала 700 теорем [23], а новая версия программы ileanCoP 1.2 доказала 717 теорем [23]. Таким образом, результаты программы WhaleProver сопоставимы с результатами лучших аналогов.

Отметим, что сравнение с опубликованными на сайте [29] результатами других программ соответствует методике, рекомендуемой признанными экспертами в области АДТ [27]. Суть этой методики наглядно демонстрирует рисунок (зависимость количества решённых задач от лимита времени на каждую задачу). Начиная с некоторой точки, прирост числа решённых задач практически прекращается, поэтому результаты программ существенно не изменятся при линейном увеличении частоты процессора или объёма ОЗУ.

Таким образом, сравнение является корректным, несмотря на то, что результаты разных программ получены на разных вычислительных машинах.

Часть задач из ILTP имеет «интуиционистский статус»: теорема или ложное утверждение. Из 811 задач, решённых программой WhaleProver (621 утверждение доказано и 190 опровергнуто), 632 имеют «интуиционистский статус» (или его можно определить по «классическому статусу»), при этом результат программы соответствует этому статусу (т. е. корректен). В число этих 632 задач входят 70 задач, которые не были решены ни одной из шести программ, официальные результаты которых



Количество решённых задач при увеличении лимита времени

представлены на сайте ILTP [29]: JProver, ft-C, ft-Prolog, ileanSeP, ileanTAP, ilean-CoP (1.0). Если также учесть неопубликованные данные регрессионного тестирования программы Imogen [16], то программа WhaleProver по сравнению со всеми семью программами решила 16 новых задач с известным статусом. Например, решены следующие задачи, которые содержат ложные (как классически, так и интуиционистски) утверждения: задача из области представления знаний KRS173+1, задачи из области обработки естественного языка NLP198+1 (обработка фрагмента текста про «old dirty white Chevy») и NLP223+1 (обработка фразы «Vincent believes that every man smokes ...»). Кроме того, программа WhaleProver позволяет решить ряд задач значительно быстрее других программ.

В программе WhaleProver также реализован интерактивный режим: перед тем, как воспользоваться тактикой автоматического поиска вывода, пользователь может вручную упростить формулу с помощью простых тактик (подобно тому, как используются тактики в программе Coq) или ввести дополнительные леммы. Такой режим позволяет решить некоторые задачи, которые не удаётся решить в полностью автоматическом режиме.

Заключение

В настоящей статье рассмотрено интуи-

ционистское исчисление обратного метода $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ для вывода формул логики первого порядка, которое отличается от существующих исчислений обратного метода использованием мультиплярных секвенций (т. е. таких, которые могут содержать более одной формулы в сукцеденте). Для исчисления $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$ и исчисления $\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$ из [15] адаптированы существующие и разработаны новые стратегии поиска вывода.

На основе разработанного алгоритма поиска вывода, позволяющего комбинировать эти стратегии, удалось создать программу АДТ, решающую новые задачи из библиотеки ILTP по сравнению с существующими аналогами. Выполнено сравнение эффективности исчислений и стратегий обратного метода. В частности, эксперименты показали, что использование мультиплярных секвенций не приводит к сильному снижению эффективности программы: в исчислении $\mathbf{I}_{inv}^{\xi}$, по сравнению с исчислением $\mathbf{IM}_{inv}^{\xi}$, время решения тестовых задач в среднем меньше лишь на 15–20 %.

В дальнейшем программу можно использовать для апробации стратегий поиска вывода, а также в качестве наглядного пособия в учебном курсе «Математическая логика». Ещё одна перспективная задача — интеграция программы в существующие интерактивные программы АДТ (Coq, Nuprl).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгалин А.Г. Математический интуиционизм. Введение в теорию доказательств. М.: Наука, 1979.
2. Клини С.К. Перестановочность применений правил в генценовских исчислениях LK и LJ // Математическая теория логического вывода. М.: Наука, 1967. С. 208–236.
3. Клини С. Математическая логика. М.: Мир, 1973.
4. Маслов С.Ю. Обратный метод установления выводимости для логических исчислений // Труды МИАН СССР. 1968. Т. 98. С. 26–87.
5. Маслов С.Ю. Тактики поиска вывода, основанные на унификации порядка членов в благоприятном наборе // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1969. Т. 16. С. 126–136.
6. Маслов С.Ю. Связь между тактиками обратного метода и метода резолюций // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1969. Т. 16. С. 137–146.
7. Маслов С.Ю. Обратный метод и тактики установления выводимости для исчисления с функциональными знаками // Тр. МИАН СССР. 1972. Т. 121. С. 14–56.
8. Маслов С.Ю. О поиске вывода в исчислениях общего типа // Зап. науч. сем. ЛОМИ. 1972. Т. 32. С. 59–65.
9. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. М.: Наука, 1971. 320 с.
10. Оревков В.П. О гливенковских классах секвенций // Логические и логикоматематические исчисления. I, Тр. МИАН СССР. 1968. Т. 98. С. 131–154.
11. Оревков В.П. Обратный метод поиска вывода для скулемовских предваренных формул исчисления предикатов // Логическое программирование и Visual Prolog. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. Приложение 4. С. 952–965.
12. Павлов В., Пак В. Экспериментальная

программа для доказательства теорем интуиционистской логики обратным методом Маслова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 6 (234). С. 70–80. DOI: 10.5862/JCSTCS.234.7.

13. **Чень Ч., Ли Р.** Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. Пер. с англ. М.: Наука, 1983. 360 с.

14. **Constable R.L.** On Building Constructive Formal Theories of Computation. Noting the Roles of Turing, Church, and Brouwer // Proc. of the 27th Annual IEEE/ACM Symp. on Logic in Computer Science. 2012. Pp. 2–8.

15. **Degtyarev A., Voronkov A.** The inverse method // Handbook of Automated Reasoning. Amsterdam: Elsevier, 2001. Vol. 1. Pp. 179–272.

16. Imogen GitHub page. URL: <https://github.com/seanmcl/imogen>. (Дата обращения: 08.02.2017).

17. **Kunze F.** Towards the Integration of an Intuitionistic First-Order Prover into Coq // Proc. of the 1st International Workshop Hammers for Type Theories. 2016. arXiv:1606.05948.

18. **Lifschitz V.** What is the inverse method? // Journal of Automated Reasoning. 1989. No. 5(1). Pp. 1–23.

19. **McCune W.** Prover9 and Mace4. URL: <https://www.cs.unm.edu/~mccune/mace4/>. 2005–2010. (Дата обращения: 12.09.2016).

20. **McLaughlin S., Pfenning F.** Efficient Intuitionistic Theorem Proving with the Polarized Inverse Method // CADE-22. LNCS. Springer, Heidelberg, 2009. Vol. 5663. Pp. 230–244.

21. **Mints G.** Resolution strategies for the Intuitionistic Logic // Constraint Programming. NATO ASI Series. Springer, Heidelberg, 1994. Vol. 131. Pp. 289–311.

22. **Mints G.** Decidability of the Class E by Maslov's Inverse Method // Essays Dedicated to Yuri Gurevich on the Occasion of His 70th Birthday. LNCS. Springer, Heidelberg, 2010. Vol. 6300. Pp. 529–537.

23. **Otten J.** Non-clausal Connection-based Theorem Proving in Intuitionistic First-Order Logic // Proc. of the 2nd International Workshop on Automated Reasoning in Quantified Non-Classical Logics. 2016. CEUR Workshop Proceedings 1770. Pp. 9–20.

24. **Pavlov V., Pak V.** The Inverse Method and First-Order Logic Theorem Proving // Nonlinear Dynamics and Applications. 2014. Vol. 20. Pp. 127–135.

25. **Raths T., Otten J., Kreitz C.** The ILTP Library: Benchmarking Theorem Provers for Intuitionistic Logic // Automated Reasoning with Analytic Tableaux and Related Methods, TABLEAUX 2005, LNAI. Springer Verlag, 2005. Vol. 3702. Pp. 333–337.

26. **Schmitt S., Lorigo L., Kreitz C., Nogin A.** JProver: Integrating Connection-Based Theorem Proving into Interactive Proof Assistants // 1st International Joint Conf., IJCAR 2001. LNCS. Springer Verlag, 2001. Vol. 2083. Pp. 421–426.

27. **Sutcliffe G., Suttner C.** Evaluating general purpose automated theorem proving systems // Artificial Intelligence. 2001. Vol. 131. Iss. 1–2. Pp. 39–54

28. **Tammet T.** A resolution theorem prover for intuitionistic logic // CADE-13. LNCS. Springer, Heidelberg, 1996. Vol. 1104. Pp. 2–16.

29. The ILTP Library. Provers and Results. URL: <http://www.cs.uni-potsdam.de/ti/iltp/results.html> (Дата обращения: 12.09.2016).

30. **Voronkov A.** Theorem Proving in Non-standard Logics Based on the Inverse Method // CADE-11. LNCS. Springer, Heidelberg, 1992. Vol. 607. Pp. 648–662.

REFERENCES

1. **Dragalin A.G.** *Matematicheskii intuitsionizm. Vvedeniye v teoriyu dokazatelstv* [Mathematical intuitionism. Introduction to the theory of evidence]. Moscow: Nauka Publ., 1979. (rus)

2. **Kleene S.C.** Permutability of Inferences in Gentzen's Calculi LK and LJ. Mem. Amer. Math. Soc. 1952, No. 10, Pp. 1–26 [Russian transl. in *Matematicheskaya teoriya logicheskogo vyvoda*, Moscow, Nauka Publ., 1967, Pp. 208–236].

3. **Kleene S.** *Matematicheskaya logika* [Mathematical logic]. Moscow: Mir Publ., 1973. (rus)

4. **Maslov S.Yu.** Obratnyy metod ustanovleniya vyvodimosti dlya logicheskikh ischisleniy [The inverse method for establishing deducibility for logical calculus]. Tr. MIAN SSSR, 1968, Vol. 98, Pp. 26–87. (rus)

5. **Maslov S.Yu.** Taktiki poiska vyvoda, osnovannyye na unifikatsii poryadka chlenov v blagopriyatnom nabore [Deduction search tactics

based on the unification of the order of members in favorable sets]. Zap. nauchn. sem. LOMI, 1969, Vol. 16, Pp. 126–136. (rus)

6. **Maslov S.Yu.** Svyaz mezhdu taktikami obratnogo metoda i metoda rezolyutsiy [A connection between tactics of the inverse method and the resolution method]. Zap. nauchn. sem. LOMI, 1969, Vol. 16, Pp. 137–146. (rus)

7. **Maslov S.Yu.** Obratnyy metod i taktiki ustanovleniya vyvodimosti dlya ischisleniya s funktsionalnymi znakami [The inverse method, and tactics for establishing deducibility for a calculus with functional signs]. Tr. MIAN SSSR, 1972, Vol. 121, Pp. 14–56. (rus)

8. **Maslov S.Yu.** O poiske vyvoda v ischisleniyakh obshchego tipa [The search for a deduction in the general type]. Zap. nauchn. sem. LOMI, 1972, Vol. 32, Pp. 59–65. (rus)

9. **Mendelson E.** *Vvedeniye v matematicheskuyu*

logiku [Introduction to Mathematical Logic]. Moscow: Nauka Publ., 1971, 320 p. (rus)

10. **Orevkov V.P.** On Glivenko sequent classes (Russian). *Trudy Matem. Inst. AN SSSR*, 1968, Vol. 98, Pp. 131–154 (rus) [English transl. in Proc. Steklov Inst. of Mathematics 98, Pp. 147–173, AMS, Providence, 1971].

11. **Orevkov V.P.** Obratnyy metod poiska vyvoda dlya skulemovskikh predvarennykh formul ischisleniya predikativ [Reverse output method of searching for skulemovskikh prenex predicate calculus formulas]. *Logicheskoye programirovaniye i Visual Prolog [Logic Programming and Visual Prolog]*. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2003, Pp. 952–965. (rus)

12. **Pavlov V., Pak V.** Eksperimentalnaya programma dlya dokazatelstva teorem intuitionistskoy logiki obratnym metodom Maslova. [An Experimental Computer Program for Automated Reasoning in Intuitionistic Logic Using the Inverse Method]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2015, Vol. 6 (234), Pp. 70–80. DOI: 10.5862/JCSTCS.234.7 (rus)

13. **Chang Ch., Lee R.** Matematicheskaya logika i avtomaticheskoye dokazatelstvo teorem [Mathematical logic and automated theorem proving]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 360 p. (rus)

14. **Constable R.L.** On Building Constructive Formal Theories of Computation. Noting the Roles of Turing, Church, and Brouwer. *Proceedings of the 27th Annual IEEE/ACM Symposium on Logic in Computer Science*, 2012, Pp. 2–8.

15. **Degtyarev A., Voronkov A.** The inverse method. *Handbook of Automated Reasoning*. Amsterdam: Elsevier, 2001, Vol. 1, Pp. 179–272.

16. **Imogen GitHub page**. Available: <https://github.com/seanmcl/imogen> (Accessed: 08.02.2017).

17. **Kunze F.** Towards the Integration of an Intuitionistic First-Order Prover into Coq. *Proceedings of the 1st International Workshop Hammers for Type Theories*, 2016, arXiv:1606.05948.

18. **Lifschitz V.** What is the inverse method? *Journal of Automated Reasoning*, 1989, No. 5(1), Pp. 1–23.

19. **McCune W.** *Prover9 and Mace4*. Available: <https://www.cs.unm.edu/~mccune/mace4/>.

2005–2010 (Accessed: 12.09.2016).

20. **McLaughlin S., Pfenning F.** Efficient Intuitionistic Theorem Proving with the Polarized Inverse Method. *CADE-22. LNCS*. Springer, Heidelberg, 2009, Vol. 5663, Pp. 230–244.

21. **Mints G.** Resolution strategies for the Intuitionistic Logic. *Constraint Programming. NATO ASI Series*. Springer, Heidelberg, 1994, Vol. 131, Pp. 289–311.

22. **Mints G.** Decidability of the Class E by Maslov's Inverse Method. *Essays Dedicated to Yuri Gurevich on the Occasion of His 70th Birthday. LNCS*. Springer, Heidelberg, 2010, Vol. 6300, Pp. 529–537.

23. **Otten J.** Non-clausal Connection-based Theorem Proving in Intuitionistic First-Order Logic. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Automated Reasoning in Quantified Non-Classical Logics*, 2016. CEUR Workshop Proceedings 1770, Pp. 9–20.

24. **Pavlov V., Pak V.** The Inverse Method and First-Order Logic Theorem Proving. *Nonlinear Dynamics and Applications*, 2014, Vol. 20, Pp. 127–135.

25. **Raths T., Otten J., Kreitz C.** The ILTP Library: Benchmarking Theorem Provers for Intuitionistic Logic. *Automated Reasoning with Analytic Tableaux and Related Methods, TABLEUX 2005, LNAI*. Springer Verlag, 2005, Vol. 3702, Pp. 333–337.

26. **Schmitt S., Lorigo L., Kreitz C., Nogin A.** JProver: Integrating Connection-Based Theorem Proving into Interactive Proof Assistants. *1st International Joint Conference, IJCAR 2001, LNCS*, Springer Verlag, 2001, Vol. 2083, Pp. 421–426.

27. **Sutcliffe G., Suttner C.** Evaluating general purpose automated theorem proving systems. *Artificial Intelligence*, 2001, Vol. 131, Issues 1–2, Pp. 39–54.

28. **Tammet T.** A resolution theorem prover for intuitionistic logic. *CADE-13. LNCS*. Springer, Heidelberg, 1996, Vol. 1104, Pp. 2–16.

29. *The ILTP Library. Provers and Results*. Available: <http://www.cs.uni-potsdam.de/ti/iltp/results.html> (Accessed: 12.09.2016).

30. **Voronkov A.** Theorem proving in non-standard logics based on the inverse method. *CADE-11. LNCS*. Springer, Heidelberg, 1992, Vol. 607, Pp. 648–662.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ПАВЛОВ Владимир Александрович

PAVLOV Vladimir A.

E-mail: vlapav239@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.09.2016

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017



DOI: 10.18721/JCSTCS.10105

УДК 004.942, 532.517.3

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СРЕД

*Л.М. Курочкин¹, А.С. Чернышев², М.А. Курочкин¹,
Д.А. Домрачев¹, М.В. Прохоров¹*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургское отделение Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Численное моделирование динамики жидкости и газа, и многофазных сред в частности, является перспективным направлением исследований и инженерных разработок. В области многофазных сред экспериментальные методики иногда не позволяют получать детальные данные о структуре течения из-за большого количества вовлеченных физических явлений. Учет всех необходимых процессов и явлений при численном моделировании для построения полной картины течения, а также расчет практически важных задач требует использования большого количества вычислительных ресурсов, что делает невозможным проведение компьютерного моделирования на отдельных рабочих станциях. Применение методики распараллеливания существующих алгоритмов решения уравнений многофазных сред при помощи библиотеки OpenMP, а также использование суперкомпьютерных технологий позволяет сократить время моделирования и произвести расчет сложных течений. В статье описаны модель полидисперсной среды, алгоритм решения основополагающих уравнений модели, основные элементы численного метода и методика проведения компьютерных экспериментов. Представлены зависимости времени расчетов модели, проводимых в СКЦ «Политехнический», от количества потоков и параметров модели.

Ключевые слова: численные методы; многофазные среды; неструктурированные сетки; параллельные вычисления; суперкомпьютерные технологии.

APPLICATION OF SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES FOR STUDYING THE DYNAMICS OF POLYDISPERSE MEDIUMS

*L.M. Kurochkin¹, A.S. Chernyshev², M.A. Kurochkin¹,
D.A. Domrachev¹, M.V. Prokhorov¹*

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation;

² Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg branch)
St. Petersburg, Russian Federation

Numerical modeling of gas and liquid flows and, in particular, multiphase mediums, is a promising direction of scientific investigations and development of industrial apparatus. The experimental approach in the field of multiphase flows does not always allow obtaining the required information about the flow structure due to the excessive amount of physical phenomena involved. Numerical simulations of real flows with inclusion of all processes and phenomena or on real-scale geometries

are very resource-demanding and are not feasible on stand-alone personal working stations. Thus, applying parallelization techniques for the existing solution algorithms with the means of the OpenMP library alongside supercomputer technologies can reduce computational time and can help with simulations of complex flows. The study presents the description of the previously developed mathematical model of polydisperse multiphase flows, a numerical algorithm for the solution of the governing equations of the model, description of the numerical method and technique of conducting the numerical experiments. The results presented in the paper have been obtained during numerical experiments carried out at the Politekhnikhesky SC, and comprise the dependencies of program working time on the amount of threads and model parameters.

Keywords: numerical methods; multiphase mediums; unstructured grids; parallel computing; supercomputing technology.

Численное моделирование как эффективный инструмент исследования различных физических явлений находит широкое применение для решения большого круга научных и практических задач, в частности, для решения задач динамики многофазных полидисперсных потоков. Интерес к многофазным полидисперсным средам связан с их широкой распространенностью как в природе, так и в технологических процессах. В качестве примеров можно привести задачи о вскипании охладителя в контурах ядерного реактора, образование пузырей при падении давления в топливопроводах, оптимизации химических пузырьков реакторов и многие др.

Получение детальной и физически корректной картины течения во многих случаях связано с решением большого количества определяющих модельных уравнений и необходимостью хранить сопутствующие поля параметров задачи, что накладывает ограничения на использование подхода из-за конечности объема оперативной памяти и мощности процессора в вычислительной системе. Таким образом, создание масштабируемых многопроцессорных систем и проведение параллельных вычислений представляется единственным способом преодоления этой проблемы.

В статье представлено параметрическое численное исследование эффективности параллелизации на примере задачи о пузырьковой колонне [1]. Существующий компьютерный код, основанный на ранее разработанных математической модели и алгоритме решения определяющих уравнений [1, 2], будет распараллелен на

общей памяти при помощи технологии OpenMP. Математическая модель основана на эйлерово-эйлеровском подходе к описанию многофазных сред [2] и включает в себя модель полидисперсных пузырей, в рамках которой вводится N классов пузырей, для каждого класса записываются свои уравнения сохранения массы и импульса. Исходная система дополнена уравнениями k - ω -SST модели турбулентности, а также источниками слагаемыми, учитывающими межфазное взаимодействие.

Анализ проблемы

Исследования течений жидкости и газа, а также сопутствующих процессов, с помощью численных методов получили большое распространение начиная с 80-х гг. XX века. Многие аспекты численных методов были разработаны ранее, однако, их применение в реальных задачах было затруднено из-за сложности процессов, происходящих в такого рода течениях, сложности рассчитываемых геометрий, а также требуемой точности, предъявляемой к результатам, что прямо связано с размерами расчетной сетки.

В области численного решения задач динамики многофазных сред на текущий момент проведено большое количество исследований. Значительное количество публикаций посвящено исследованиям дисперсных сред с привлечением лагранжево-эйлеровского и эйлерово-эйлеровского подходов. К первому можно отнести работы [3–5], в которых рассмотрено низкоскоростное движение дисперсных включений, а также [6], где исследованы высокоскоростные процессы образования и последующей динамики

пузырьков. Эйлера-эйлеровский подход освещен в работах Пахомова и Терехова [7, 8] по динамике вертикального движения пузырьков со сложным межфазным взаимодействием. Расчет полидисперсных течений можно найти, например, в работах [9, 10]. Также проводились сравнения различных, в том числе открытых, вычислительных кодов для моделирования многофазных сред (см. например [11]).

Расчеты методами прямого численного моделирования (Uhlmann, Tryggvason [12–14]) позволяют получить детализованную картину течения, однако их использование ограничено относительно простыми задачами, такими как движение разреженного потока твердых частиц в прямоугольном канале [12], движение группы деформируемых пузырей [13] или движение нескольких пузырей с подробным разрешением течения вокруг каждого пузыря с учетом межфазного массообмена [14].

Стоит отметить, что современные расчеты проводятся либо в последовательном режиме, если позволяет размер расчетной области, либо распараллеливаются при помощи технологии распределенной памяти (MPI), что по умолчанию включено в большинство коммерческих пакетов и открытых кодов. Реализация компьютерных алгоритмов при помощи библиотеки OpenMP (см. например [15–17]) позволяет максимально эффективно использовать ресурсы вычислительных комплексов с общей памятью в связи с развитием в последнее время многоядерных многопроцессорных систем.

Настоящая статья посвящена исследованию возможности параллелизации существующего расчетного кода на вычислительных системах с общей памятью при помощи технологии OpenMP и проведении тестовых расчетов в СКЦ «Политехнический» для определения эффективности предложенного подхода.

Постановка задачи

Разработанная ранее математическая модель процессов в дисперсных средах основана на эйлера-эйлеровском подходе к описанию полидисперсных многофазных сред [1, 2]. Полидисперсность учитывается

при помощи модели MUSIG [18], в рамках которой распределение пузырей по размерам выражается в виде кусочно-постоянной функции, пузыри определенного размера соответствуют определенному классу i , всего вводится N классов пузырей. В текущей постановке коалесценцией и дроблением пузырей пренебрегается из-за малой объемной доли пузырей и сохранения их сферической формы. Уравнения Навье-Стокса в этом случае имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_{ib} \rho_b}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_{ib} \rho_b \vec{V}_{ib}) &= \Gamma_{ib}, \\ \frac{\partial \alpha_{ib} \rho_b \vec{V}_{ib}}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_{ib} \rho_b \vec{V}_{ib} \vec{V}_{ib} + p \vec{E}) &= S_{ib}, \\ \frac{\partial (1 - \sum_{i=1}^N \alpha_{ib}) \rho_l}{\partial t} + \operatorname{div} \left(\left(1 - \sum_{i=1}^N \alpha_{ib} \right) \rho_l \vec{V}_l \right) &= \Gamma_l, \\ \frac{\partial (1 - \sum_{i=1}^N \alpha_{ib}) \rho_l \vec{V}_l}{\partial t} + \\ + \operatorname{div} \left(\left(1 - \sum_{i=1}^N \alpha_{ib} \right) \rho_l \vec{V}_l \vec{V}_l + p \vec{E} - \bar{\tau}_l \right) &= S_l. \end{aligned}$$

Здесь α — объемная доля пузырей соответствующего класса; ρ — плотность среды; V — скорость соответствующей фазы; Γ — источниковое слагаемое, отвечающее за перенос массы между фазами; S — источниковое слагаемое, отвечающее за перенос импульса между фазами; τ — тензор скоростей деформации. Подстрочный индекс l относится к жидкой фазе, b — к пузырьковой. Уравнения модели записаны в предположении изотермичности и равновесности протекающих процессов.

Распределение пузырей в объеме жидкости по их размерам может быть задано лог-нормальной функцией или функцией распределения Розина-Раммлера:

$$\begin{aligned} \text{LN} : \frac{1}{R\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-(\ln(R) - \mu)^2 \cdot 0,5\sigma^{-2}), \\ \text{RR} : \frac{k}{\lambda} \left(\frac{R}{\lambda} \right)^{k-1} \cdot \exp(-(R/\lambda)^k), R \geq 0, \end{aligned}$$

где R — радиус пузыря; μ , σ , k и λ — параметры, определяющие форму функции распределения.

В общем случае каждый из пузырей может состоять из смеси разнородных газов, концентрацию каждого из которых для определенных классов задач необходимо учитывать. С этой целью модель была расширена для возможности учета динамики газовых компонент для каждого класса пузырей. Уравнения переноса концентрации χ_{ij} , отвечающего за концентрацию газовой компоненты j , для каждого пузыря в радиальной системе координат, связанной с пузырем, имеют вид [19]:

$$\frac{\partial \chi_{ij}}{\partial t} = D_j \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \chi_{ij}}{\partial r} \right) \right].$$

Для расчета диффузии на границе пузырь-жидкость используется закон Генри. Перенос массы в уравнениях сохранения можно выразить следующим образом:

$$\Gamma_{ib} = \sum_j \frac{3\alpha_{ib} D_j}{R_i} \nabla \chi_{ij}, \Gamma_l = -\sum_i \Gamma_{ib}.$$

Турбулентность учитывается при помощи модели k - ω -SST:

$$\frac{\partial(\rho_l k)}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \vec{V}_l k)$$

$$\tilde{P} - \beta \rho_l \omega k + \text{div}[(\mu_{lam} + \sigma_k \mu_{turb}) \text{grad} k] + \sum_{i=1}^N S_{ibk},$$

$$\frac{\partial(\rho_l \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \vec{V}_l \omega)$$

$$\alpha_{k\omega} \frac{\rho_l}{\mu_{turb}} \tilde{P} - \beta \rho_l \omega^2 + \text{div}[(\mu_{lam} + \sigma_\omega \mu_{turb}) \text{grad} \omega] + 2(1 - F_1) \rho_l \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^N S_{i\omega},$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ω – удельная диссипация турбулентности; $\tilde{P}$ – генерационное слагаемое; μ_{lam} , μ_{turb} – молекулярная и турбулентная вязкости. Дополнительные слагаемые, отвечающие за генерацию и диссипацию турбулентности пузырями:

$$S_{ibk} = \frac{3}{8} \frac{C_{iD}}{R_{ib}} \alpha_{ib} \rho_l |\vec{V}_{irel}|^3, S_{i\omega} = 0,8 \frac{k}{\mu_{turb}} S_{ibk}.$$

Межфазный перенос импульса. Источниковое слагаемое в уравнении сохране-

ния импульса включает силу тяжести, силу Стокса F_{iD} , силу Сэффмана F_{iL} и силу, отвечающую за дисперсию пузырей из-за турбулентных пульсаций скорости несущей фазы F_{iTD} . В общем случае для пузырьковых течений значительный вклад вносит сила присоединенных масс, однако в текущей постановке исследуется установившийся режим течения, поэтому этой силой можно пренебречь. Остальные силы исключаются из рассмотрения в силу их малости (например, силы Бассе, Магнуса). Выражение для силового взаимодействия имеет вид:

$$S_{ib} = \alpha_{ib} \rho_b \vec{g} + \vec{F}_{iD} + \vec{F}_{iL} + \vec{F}_{iTD},$$

$$S_l = \left(1 - \sum_{i=1}^N \alpha_{ib} \right) \rho_l \vec{g} - \sum_{i=1}^N (\vec{F}_{iD} + \vec{F}_{iL} + \vec{F}_{iTD}),$$

$$\vec{F}_{iD} = \frac{3\rho_l}{8R_{ib}} C_{iD} \vec{V}_{irel} |\vec{V}_{irel}|, \vec{V}_{irel} = \vec{V}_l - \vec{V}_{ib},$$

$$\vec{F}_{iL} = C_{iL} \alpha_{ib} \rho_l \vec{V}_{irel} \times \text{rot} \vec{V}_l,$$

$$\vec{F}_{iTD} = -1,2 C_{iD} \frac{3}{8} \frac{|\vec{V}_{irel}|}{R_{ib}} \mu^{eff} \nabla \alpha_{ib}.$$

Коэффициенты C_{iD} и C_{iL} взяты из [20] и [21] соответственно.

Численный метод и алгоритм решения уравнений

Численный метод решения модельных уравнений основан на конечно-объемном подходе и неструктурированных сетках. Расчет полей давления и скоростей фаз реализован при помощи алгоритма SIMPLE, модифицированного для многофазных полидисперсных потоков. Второй порядок точности по пространству обеспечен TVD схемами дискретизации конвективных потоков, итерационный процесс реализован при помощи метода установления по псевдовремени. Корректирующие поправки введены в схемы вычисления градиента для устранения влияния скошенности сетки.

Реализация параллельного алгоритма требует анализа процесса исполнения исходного кода программы и последовательности решения уравнений, входящих в модель. Уравнения в рамках предложенной модели, в случае последовательного алгоритма, решаются в порядке, представлен-

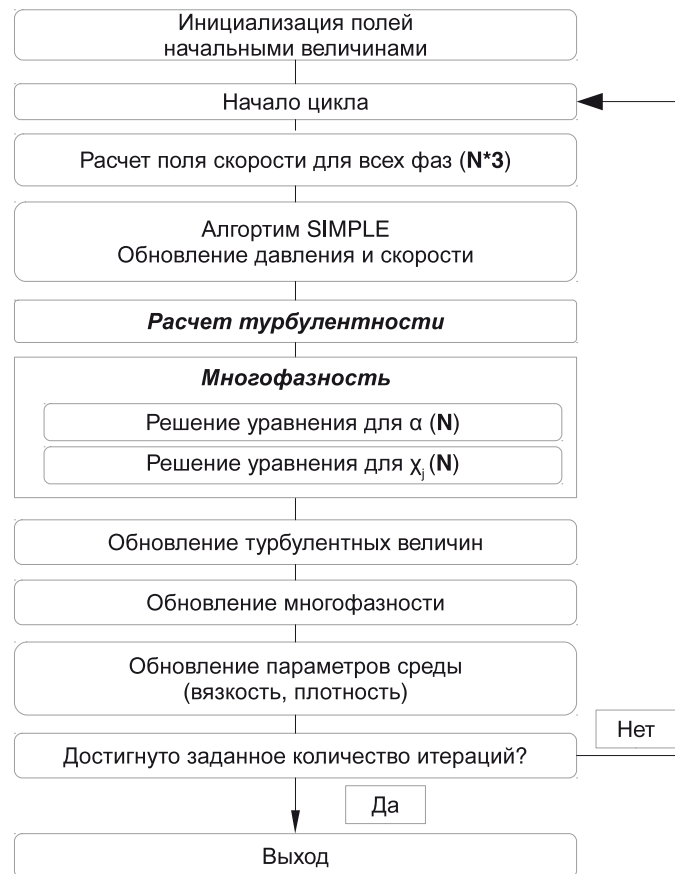


Рис. 1. Алгоритм решения уравнений модели

ном на рис. 1. Для реализации параллельной версии программы в рамках технологии OpenMP необходимо оценить, какие из этапов алгоритма поддаются эффективной и экономичной, с точки зрения разработки дополнительного программного кода, параллелизации.

На основе рассмотрения приведенной математической модели можно сделать вывод, что этапы расчета полей скорости, объемной доли пузырей α и расчета дополнительных скаляров χ линейно зависят от количества классов пузырей N . При этом решение каждого из уравнений на этих этапах не зависит от решения аналогичных уравнений для других классов пузырей. Таким образом, представляется возможным распараллеливание алгоритма для этих этапов расчета по классам пузырей. Остальные этапы предложенного алгоритма выполняются последовательно.

Инструментальная среда моделирования

В исходной программе mFlow, реализующей решения уравнения предложенной математической модели, были выделены фрагменты последовательной и параллельной обработки данных. Параллельная обработка реализована в блоке «Многофазность». Начальные установки «расчет поля скорости» и «обновление давления и скорости» выполнялись последовательно. Распараллеливание программы выполнялось на основе технологии OpenMP.

Эксперименты проводились на суперкомпьютере СКЦ «Политехнический» [22]. Удаленный доступ к ресурсам СКЦ организован по ssh. Доступ к выделенным ресурсам и запуск задач выполнялся с помощью менеджера кластеров SLURM — высокомасштабируемого отказоустойчивого менеджера кластеров и планировщика заданий для больших кластеров вычислительных узлов.

Менеджер кластеров SLURM обеспечивает поддержку очереди ожидающих заданий; управляет общей загрузкой ресурсов в процессе выполнения работы.

Вычислительная среда СКЦ, имея общую пиковую производительность более 1,2 ПФлопс, включает в себя:

- гетерогенный кластер в составе 668 двухпроцессорных узлов с новейшими 14-ядерными процессорами Intel Xeon E5 2695 v3 и 64 ГБ оперативной памяти; пиковая производительность кластера составляет 938 ТФлопс;

- уникальную вычислительную систему с массовым параллелизмом и ультра-высокой многоточностью на процессорах Intel Xeon Phi, содержащую 256 узлов; пиковая производительность системы – 259 ТФлопс;

- массивно-параллельный суперкомпьютер с кеш-когерентной глобально адресуемой памятью объемом более 12 ТБ и пиковой производительностью 30 ТФлопс.

Для решения задачи были выделены 612 вычислительных узлов с 56 ядрами:

```
tornado : nodes: 612
cpu: 2 x Intel Xeon CPU E5-2697 v3 @ 2.60 GHz
cores/hwthreads: 28 / 28
mem: 64G
net: 56Gbps FDR Infiniband
* tornado-k40 : nodes: 56
cpu: 2 x Intel Xeon CPU E5-2697 v3 @ 2.60 GHz
cores/hwthreads: 28 / 28
co-processor: 2 x Nvidia Tesla K40x
co-processor mem: 12G
mem: 64G
```

net: 56Gbps FDR Infiniband

Описание экспериментов

В экспериментальном исследовании определялась зависимость времени выполнения программы в параллельной среде от комбинации входных данных и числа потоков, на которых выполнялась программа. Измерение времени производилось с помощью утилиты time.

Изменяемые параметры:

I – число классов пузырей – 1; 10; 20; 30.

J – число дополнительных переменных – 0; 10; 20.

P – число потоков – 1; 10; 20; 30; 40; 50.

Входные данные объединены в 12 групп. Для каждой группы было проведено шесть экспериментов с разным числом потоков.

Анализ результатов. Ниже представлены результаты измерений времени работы программы: зависимость количества потоков, на которые была распараллелена программа, от числа типов пузырей и числа дополнительных переменных

Из таблиц 1 и 2 видно, что при минимальных значениях параметров $I = 1$, $J = 0$ время выполнения одинаково как при последовательном выполнении, так и при параллельном и занимает 5 мин. При максимальных значениях $I = 30$, $J = 20$ время выполнения в последовательном варианте занимает 111 мин, а при параллельном, при числе потоков 50 занимает 33 мин. Графически эти зависимости приведены на рис. 2

Таблица 1

Время выполнения программы при 1 и 10 типах пузырей

Число потоков	$I = 1$	$I = 1$	$I = 1$	$I = 10$	$I = 10$	$I = 10$
	$J = 0$	$J = 10$	$J = 20$	$J = 0$	$J = 10$	$J = 20$
1	301,23	411,11	469,31	968,87	1625,19	2375,86
10	301,04	387,56	457,61	602,78	860,25	1024,10
20	304,72	444,55	485,80	612,79	804,70	1010,84
30	293,95	398,69	505,82	560,60	769,46	978,66
40	300,43	417,19	509,58	550,26	755,57	967,61
50	301,86	385,68	493,28	578,97	783,76	945,42

Таблица 2

Время выполнения программы при 20 и 30 типах пузырей

Число потоков	$I = 20$	$I = 20$	$I = 20$	$I = 30$	$I = 30$	$I = 30$
	$J = 0$	$J = 10$	$J = 20$	$J = 0$	$J = 10$	$J = 20$
1	1595,42	3248,53	4992,84	2163,08	4806,33	6682,79
10	965,24	1391,71	1800,49	1335,05	1946,25	2469,88
20	924,98	1186,11	1425,56	1286,96	1720,17	2127,27
30	879,01	1187,06	1388,24	1246,58	1515,60	1880,72
40	841,69	1141,89	1374,74	1174,43	1495,01	1845,66
50	838,22	1126,37	1374,76	1182,45	1497,85	1822,46

Начальное значение времени работы программы (при $J = 0$) зависит от числа типов пузырей. То есть при последовательном выполнении программы и отсутствии дополнительных переменных время выполнения программы увеличивается на минуту при добавлении нового типа пузырей (табл. 3).

Таблица 3

Время выполнения программы
в однопоточном режиме $p = 1$,
без дополнительных переменных $J = 0$

Число типов I	Время, с
1	301,23
10	968,87
20	1595,42
30	2163,08

Видно, что зависимость линейная, но скорость роста также зависит от числа типов пузырей. Время выполнения растет быстрее при большем числе пузырей (угол между прямой и абсциссой).

На рис. 3 представлена зависимость времени выполнения программы от числа дополнительных переменных для $p = 1$, $p = 10$. При параллельном выполнении программы и отсутствии дополнительных переменных время выполнения программы увеличивается на 30 с при добавлении нового типа пузырей, что в два раза меньше, чем при последовательном выполнении.

Данные, приведенные в табл. 4, показывают, что при увеличении числа типов пузырей время выполнения программы растет линейно. Для параллельного режима

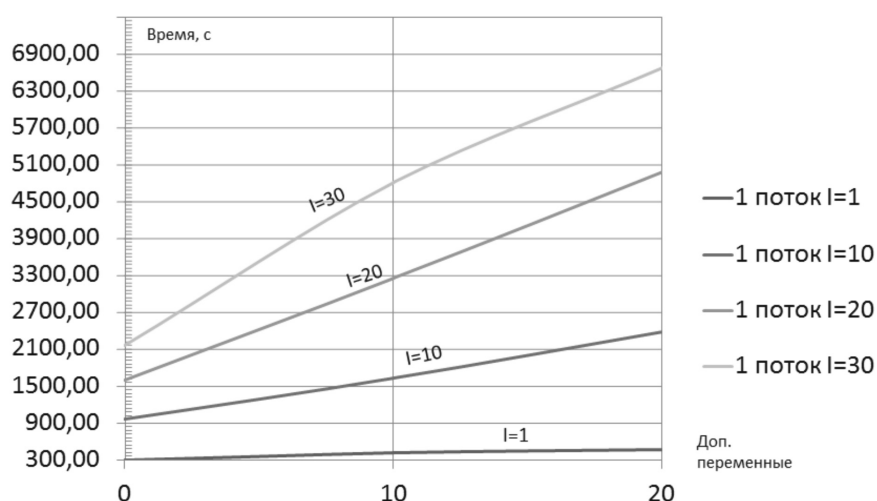


Рис. 2. Зависимость времени выполнения программы от числа дополнительных переменных при однопоточном выполнении программы

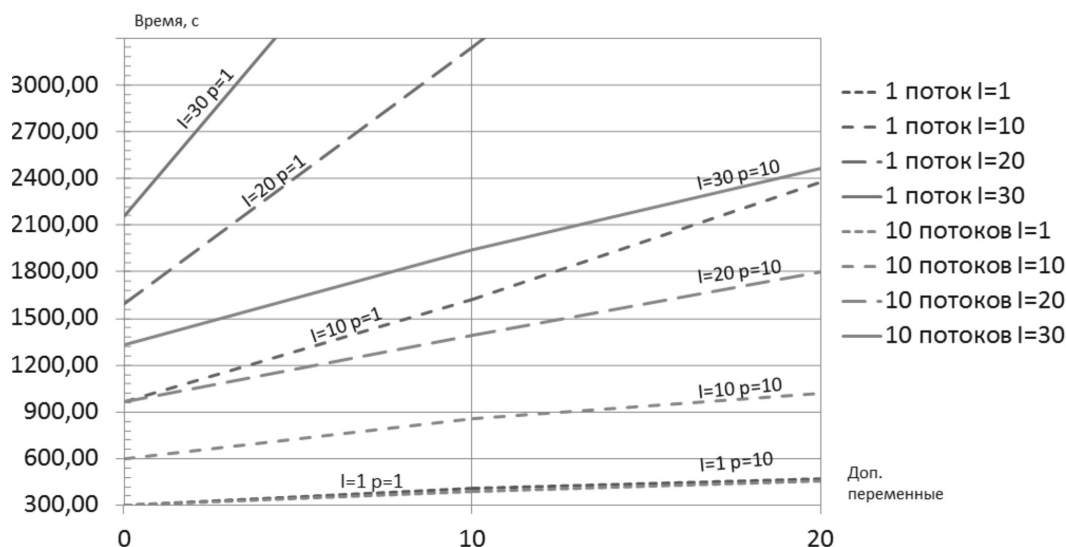


Рис. 3. Зависимость времени выполнения программы от числа дополнительных переменных для $p = 1$, $p = 10$

Таблица 4

Зависимость времени выполнения программы в однопоточном и параллельном режимах, без дополнительных переменных

Число типов I	Время, с при $P = 1, J = 0$	Время, с при $P = 10, J = 0$
1	301,23	301,04
10	968,87	602,78
20	1595,42	965,24
30	2163,08	1335,05

скорость роста в полтора раза меньше чем при однопоточном.

На рис. 4 приведен график зависимости времени выполнения программы от числа дополнительных переменных для различного числа потоков.

Результаты экспериментов объединены по числу типов пузырьков. Представленные зависимости показывают, что увеличение числа потоков при фиксированном числе типов пузырей ($I = \text{const}$) уменьшает время выполнения в многопоточном режиме. Для случая $I = 30$, $J = 20$ дополнительные 10 потоков уменьшают время выполнения на 400 с. Так, при 10 потоках программа выполняется 2469,88 с, при 20 потоках – 2127,27 с, при 30 потоках – 1880,72 с.

Влияние числа потоков на скорость роста при увеличении числа дополнительных

переменных прослеживается при $P < I$. В случае $I = 30$ увеличение числа потоков (более 30) практически не влияет на время выполнения программы, т. е. наступает насыщение около отметки 1800 с при 20 дополнительных переменных. Для $p = 10$ время выполнения программы растет линейно и приближается к 2500 с. Эффект насыщения можно объяснить спецификой используемого алгоритма решения задачи, в котором распараллеливание возможно только в блоке «многофазность».

При $I = 20$ скорость роста времени прекращается при распараллеливании на 20 и более потоков. При $I = 1$ и $I = 10$ она одинакова.

Итак, при фиксированном числе типов пузырей ($I = \text{const}$) скорость роста времени выполнения программы зависит от числа

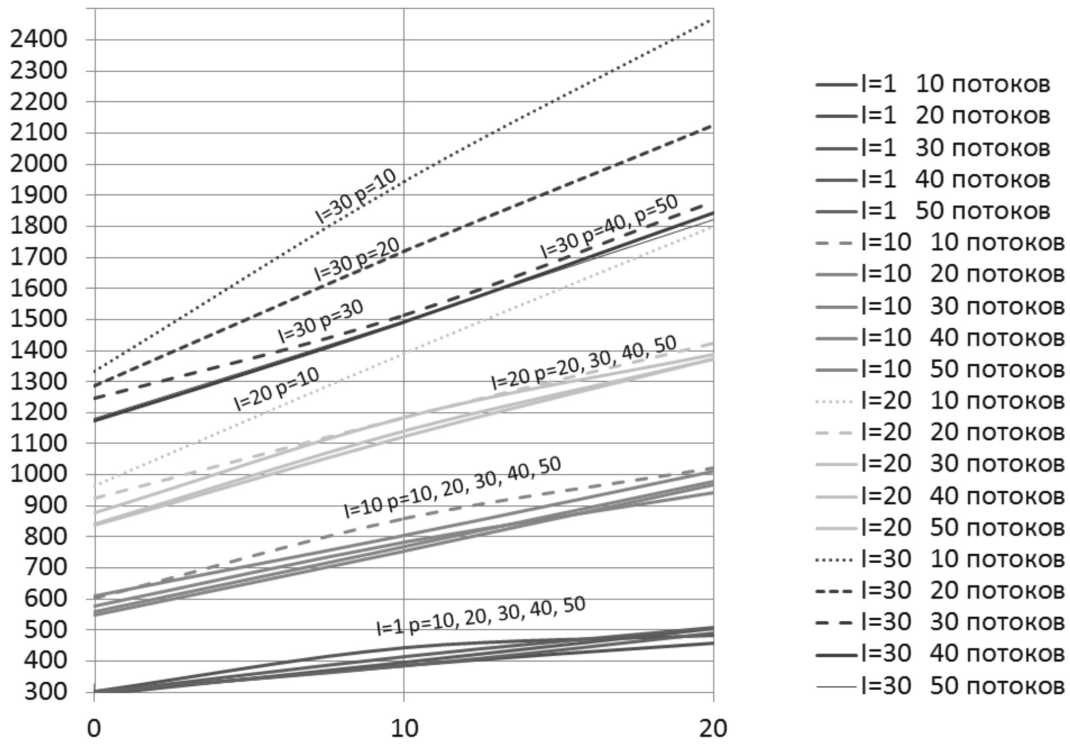


Рис. 4. Зависимость времени выполнения программы от числа дополнительных переменных для параллельного выполнения на различном числе потоков

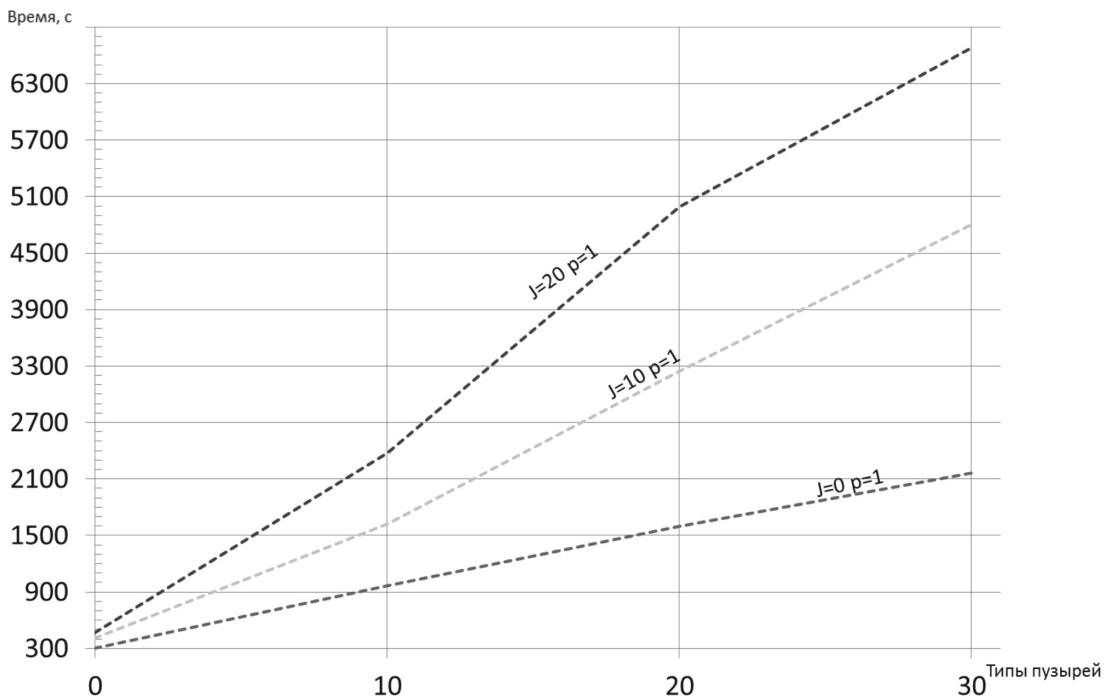


Рис. 5. Зависимость времени выполнения программы от числа типов пузырей при последовательном режиме выполнения программы

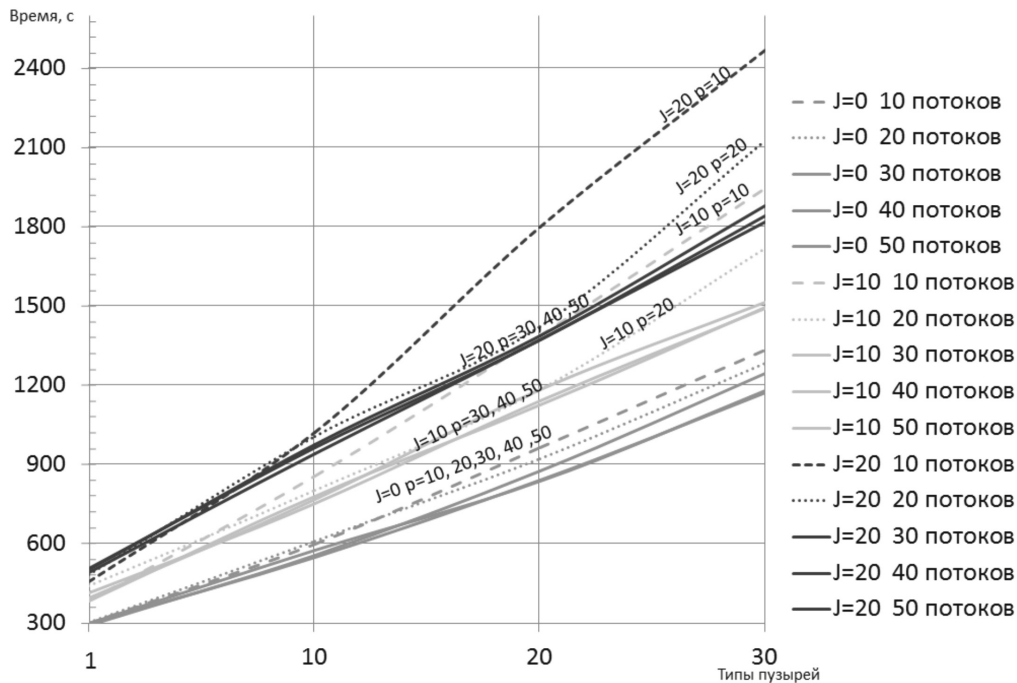


Рис. 6. Зависимость времени выполнения программы от числа типов пузырей при параллельном выполнении программы

потоков. Она уменьшается при росте числа потоков, и достигает минимума при $p \geq I$.

На рис. 5 представлена зависимость времени выполнения программы от числа типов пузырей.

Приведенная на рисунке зависимость является линейной. Увеличение в два раза числа дополнительных переменных увеличивает время выполнения программы примерно в два раза.

Следующий набор зависимостей (рис. 6) демонстрирует, что при одном типе пузырьков время увеличивается с ростом числа дополнительных переменных. Скорость роста времени при увеличении числа типов пузырей зависит от числа потоков: она уменьшается с увеличением числа потоков. При выполнении условия $p > J$ скорость роста становится минимальной.

Зависимости времени от числа типов пузырей и числа дополнительных переменных имеют линейный характер. Количество типов пузырей больше влияет на время выполнения программы, чем количество дополнительных переменных. Интенсивность

роста времени с увеличением одного из параметров и фиксированном значении другого зависит от числа потоков. Для уменьшения времени выполнения программы необходимо использовать число потоков, равное максимальному значению из двух параметров $p = \max(I, J + 1)$. Дальнейшее увеличение числа потоков практически не влияет на результат.

Зависимости, представленные на рис. 7, показывают, что параллельный вариант реализации вычислений позволяет сократить время выполнения программы в три раза. С увеличением числа потоков более 10 время выполнения уменьшается незначительно, около 10 % в случае $I = 30, J = 30$, и менее 1 % для случая $I = 1, J = 20$. Время выполнения программы достигает минимума при распараллеливании на число потоков, равное максимальному значению одного из параметров J или I .

Представлена математическая модель, описывающая течение полидисперсной пузырьковой среды, а также алгоритм решения уравнений модели. На основе ана-

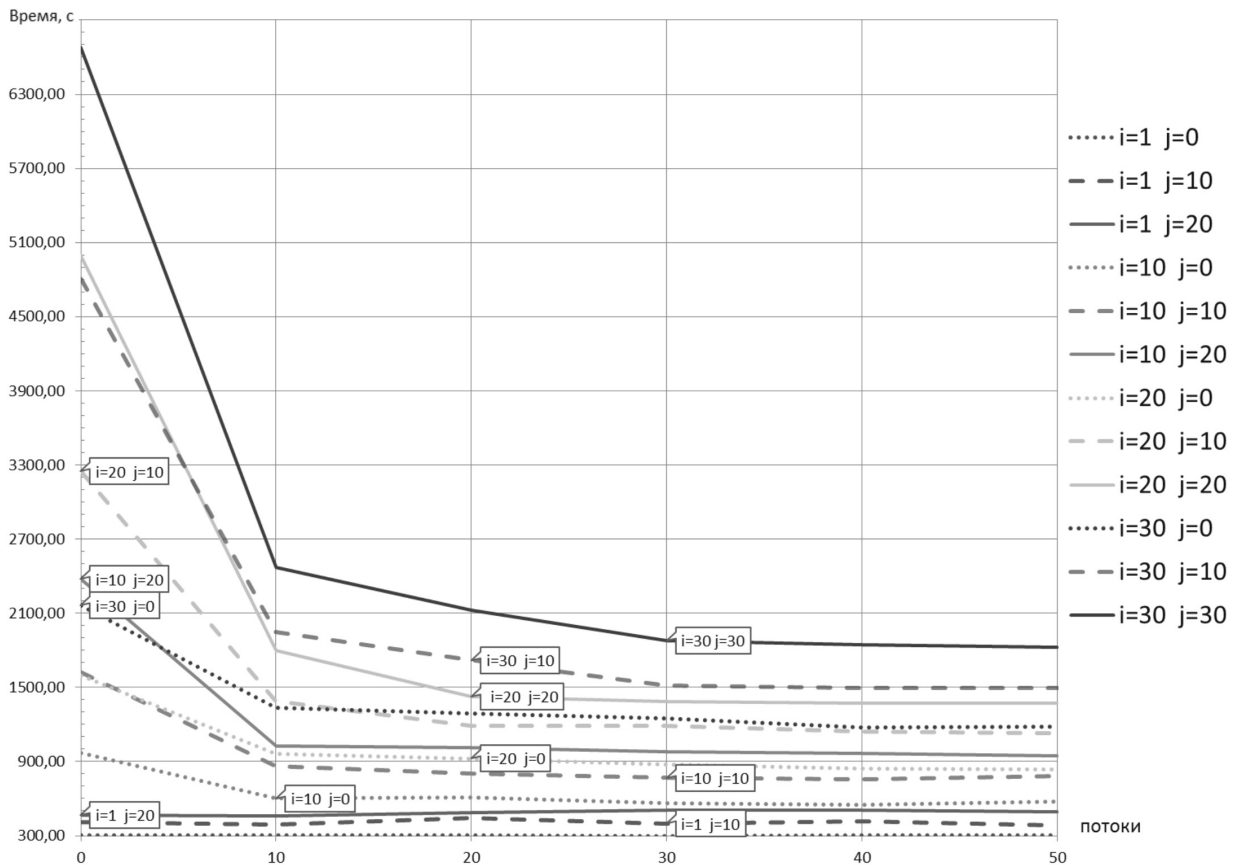


Рис. 7. Зависимость времени выполнения программы от числа потоков

лиза уравнений и их взаимного влияния выделены блоки алгоритма, в рамках которых возможно параллельное решение некоторых уравнений. Эти блоки относятся к разделу модели, отвечающей за решения уравнения переноса в границах полидисперсного описания среды.

Распараллеливание алгоритма было проведено при помощи технологии OpenMP, как наиболее экономичной с точки зрения вносимых изменений в исходный код программы, а также позволяющей наиболее эффективно использовать вычислительные системы с общей памятью.

В ходе выполнения работы с помощью технологии OpenMP была модифицирована программа mFlow, реализующая решения уравнения предложенной математической модели. Для модифицированной версии были проведены 72 эксперимента с разными наборами входных данных и измерено

время работы программы для шести вариантов параллельного исполнения.

Полученные результаты определяют линейную зависимость времени выполнения расчетов от числа дополнительных переменных и числа типов пузырей. Рост времени при фиксированном значении одного из параметров зависит от значения второго параметра и количества потоков. При минимальных значениях параметров ($I = 1$, $J = 0$) время выполнения программы не меняется. При максимальных значениях параметров ($I = 30$, $J = 20$) параллельный вариант позволяет получить выигрыш во времени в 3,6 раза по сравнению с нераспараллеленной реализацией.

При фиксированном числе типов пузырей время работы программы достигает минимума при распараллеливании программы на число потоков, равное числу типов пузырей.

При фиксированном числе дополнительных переменных время работы программы достигает минимума при распараллеливании программы на число потоков, равное числу на единицу большему числу дополнительных переменных. Последующее увеличение числа потоков сокращает время выполнения задачи на 1–3 %. Данные ограничения определяются в первую очередь структурой алгоритма решения уравнения предложенной математической модели. Очевидно, что время выполнения последовательных ветвей алгоритма будет постоянно, независимо от числа выделенных потоков.

Характер функции времени выполнения

программы определяют алгоритмические решения численных методов, реализованных в программе. Наблюдаемые участки насыщения этой функции, на которых практически отсутствует зависимость от числа выделенных потоков, определяются особенностями конкретной реализации блока «многофазность» в данной версии программы. Дальнейшее сокращение времени решения задачи возможно при более глубокой модификации базового алгоритма, внесении в него большего числа фрагментов, ориентированных на параллельное исполнение.

Статья поддержана грантом РФФИ № 16-29-04319.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernyshev A.S., Schmidt A.A. Numerical modeling of gravity driven bubble flows with account of polydispersion // *Journal of Physics. Conference Series*. 2016. Vol. 754. No. 3. 032005.
2. Chernyshev A.S., Schmidt A.A. Using the Euler-Euler approach for mathematical modeling of turbulent flows in bubbly media // *Tech. Phys. Lett.* 2013. Vol. 39(6). Pp. 548–51.
3. Lain S., Brüder D., Sommerfeld M., Guz M.F. Modelling hydrodynamics and turbulence in a bubble column using the Euler–Lagrange procedure // *Internat. J. of Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28. Issue 8. Pp. 1381–1407. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00028-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00028-9).
4. Lain S., Sommerfeld M. Characterisation of pneumatic conveying systems using the Euler/Lagrange approach // *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. Pp. 764–782. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.029>.
5. Dietzel M., Sommerfeld M. Numerical calculation of flow resistance for agglomerates with different morphology by the Lattice–Boltzmann Method // *Powder Technology*. 2013. Vol. 250. Pp. 122–137. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.09.023>.
6. Petrov N.V., Schmidt A.A. Multiphase phenomena in underwater explosion // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. Vol. 60. Pp. 367–373.
7. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Modeling of turbulent structure of an upward polydisperse gas-liquid flow // *Fluid Dynamics*. 2015. Vol. 50(2). Pp. 229–239.
8. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Application of the Eulerian approach to simulating the structure of an upward monodisperse bubbly flow in a tube // *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57(3). Pp. 432–440.
9. Bannari R., Kerdouss F., Selma B., Bannari A., Proulx P. Three-dimensional mathematical modeling of dispersed two-phase flow using class method of population balance in bubble columns // *Comp. and Chem. Eng.* 2008. Vol. 32. Pp. 3224–37.
10. Morel Ch., Ruyer P., Seiler N., Laviéville J.M. Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment // *Internat. J. of Multiphase Flow*. 2010. Vol. 36. Pp. 25–39.
11. Rzehak R., Kriebitzsch S. Multiphase CFD-simulation of bubbly pipe flow: A code comparison // *International Journal of Multiphase Flow*. 2015. Vol. 68. Pp. 135–152.
12. Uhlmann M. Interface-resolved direct numerical simulation of vertical particulate channel flow in the turbulent regime // *Physics of Fluids*. 2008. Vol. 20. 053305.
13. Bunner B., Tryggvason G. Effect of bubble deformation on the properties of bubbly flows // *J. of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 495. Pp. 77–118.
14. Aboulhasanzadeh B., Thomas S., Taeibi-Rahni M., Tryggvason G. Multiscale computations of mass transfer from buoyant bubbles // *Chemical Engineering Science*. Vol. 75. Pp. 456–467.
15. Wenjie Weia, Omar al-Khayata, Xing Caia An OpenMP-enabled parallel simulator for particle transport in fluid flows // *Procedia Computer Science*. 2011. Vol. 4. Pp. 1475–1484.
16. Yakubov S., Cankurt B., Abdel-Maksoud M., Rung Th. Hybrid MPI/OpenMP parallelization of an Euler–Lagrange approach to cavitation modelling // *Computers & Fluids*. 2013. Vol. 80. Pp. 365–371.
17. Xiaohu Guo, Lange M., Gorman G., Mitchell

L., Weiland M. Developing a scalable hybrid MPI/OpenMP unstructured finite element model // *Computers & Fluids*. 2015. Vol. 110. Pp. 227–234.

18. Krepper E., Lucas D., Frank Th., Prasser H.-M., Zwart Ph.J. The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows // *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. Pp. 1690–1702.

19. Tarik Kaya Analysis of vapor–gas bubbles in a single artery heat pipe // *Internat. J. of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52(25–26). Pp. 5731–5739.

20. Lau Y.M., Roghair I., Deen N.G., van Sint Annaland M., Kuipers J.A.M. Numerical

investigation of the drag closure for bubbles in bubble swarms // *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. Pp. 3309–3316.

21. Akio Tomiyamaa, Hidesada Tamaia, Iztok Zunb, Shigeo Hosokawaa Transverse migration of single bubbles in simple shear flows // *Chemical Engineering Science*. 2002. Vol. 57. Pp. 1849–1858.

22. Суперкомпьютерный центр «Политехнический». Ресурсы СКЦ. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. URL: <http://www.scc.spbstu.ru/index.php/resources> (Дата обращения: 10.01.2017).

REFERENCES

1. Chernyshev A.S., Schmidt A.A. Numerical modeling of gravity driven bubble flows with account of polydispersion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 754, No. 3, 032005.

2. Chernyshev A.S., Schmidt A.A. Using the Euler-Euler approach for mathematical modeling of turbulent flows in bubbly media. *Tech. Phys. Lett.*, 2013, Vol. 39(6), Pp. 548–51.

3. Lain S., Bröder D., Sommerfeld M., Guz M.F. Modelling hydrodynamics and turbulence in a bubble column using the Euler–Lagrange procedure. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, Vol. 28, Issue 8, Pp. 1381–1407. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00028-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00028-9).

4. Lain S., Sommerfeld M. Characterisation of pneumatic conveying systems using the Euler/Lagrange approach. *Powder Technology*, 2013, Vol. 235, Pp. 764–782. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.029>.

5. Dietzel M., Sommerfeld M. Numerical calculation of flow resistance for agglomerates with different morphology by the Lattice–Boltzmann Method. *Powder Technology*, 2013, Vol. 250, Pp. 122–137. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.09.023>.

6. Petrov N.V., Schmidt A.A. Multiphase phenomena in underwater explosion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, Vol. 60, Pp. 367–373.

7. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Modeling of turbulent structure of an upward polydisperse gas–liquid flow. *Fluid Dynamics*, 2015, Vol. 50(2), Pp. 229–239.

8. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Application of the Eulerian approach to simulating the structure of an upward monodisperse bubbly flow in a tube. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, Vol. 57(3), Pp. 432–440.

9. Bannari R., Kerdouss F., Selma B., Bannari A., Proulx P. Three-dimensional mathematical

modeling of dispersed two-phase flow using class method of population balance in bubble columns. *Comp. and Chem. Eng.*, 2008, Vol. 32, Pp. 3224–37.

10. Morel Ch., Ruyer P., Seiler N., Laviéville J.M. Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, Vol. 36. Pp. 25–39.

11. Rzehak R., Kriebitzsch S. Multiphase CFD-simulation of bubbly pipe flow: A code comparison. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, Vol. 68, Pp. 135–152.

12. Uhlmann M. Interface-resolved direct numerical simulation of vertical particulate channel flow in the turbulent regime. *Physics of Fluids*, 2008, Vol. 20, 053305.

13. Bunner B., Tryggvason G. Effect of bubble deformation on the properties of bubbly flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, Vol. 495, Pp. 77–118.

14. Aboulhasanzadeh B., Thomas S., Taeibi-Rahni M., Tryggvason G. Multiscale computations of mass transfer from buoyant bubbles. *Chemical Engineering Science*, Vol. 75, Pp. 456–467.

15. Wenjie Weia, Omar al-Khayata, Xing Caia An OpenMP-enabled parallel simulator for particle transport in fluid flows, *Procedia Computer Science*, 2011, Vol. 4, Pp. 1475–1484.

16. Yakubov S., Cankurt B., Abdel-Maksoud M., Rung Th. Hybrid MPI/OpenMP parallelization of an Euler–Lagrange approach to cavitation modelling, *Computers & Fluids*, 2013, Vol. 80, Pp. 365–371.

17. Xiaohu Guo, Lange M., Gorman G., Mitchell L., Weiland M. Developing a scalable hybrid MPI/OpenMP unstructured finite element model. *Computers & Fluids*, 2015, Vol. 110, Pp. 227–234.

18. Krepper E., Lucas D., Frank Th., Prasser H.-M., Zwart Ph.J. The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows.

Nuclear Engineering and Design, 2008, Vol. 238, Pp. 1690–1702.

19. **Tarik Kaya** Analysis of vapor–gas bubbles in a single artery heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, Vol. 52(25–26), Pp. 5731–5739.

20. **Lau Y.M., Roghair I., Deen N.G., van Sint Annaland M., Kuipers J.A.M.** Numerical investigation of the drag closure for bubbles in

bubble swarms. *Chemical Engineering Science*, 2011, Vol. 66, Pp. 3309–3316.

21. **Akio Tomiyama, Hidesada Tamaia, Iztok Zunb, Shigeo Hosokawa** Transverse migration of single bubbles in simple shear flows. *Chemical Engineering Science*, 2002, Vol. 57, Pp. 1849–1858.

22. *Supercomputer center «Politehnicheskii»*. Available: <http://www.scc.spbstu.ru/index.php/resources> (Accessed: 10.01.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

КУРОЧКИН Леонид Михайлович

KUROCHKIN Leonid M.

E-mail: kurochkinl@spbstu.ru

ЧЕРНЫШЕВ Александр Сергеевич

CHERNYSHEV Alexandr S.

E-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

КУРОЧКИН Михаил Александрович

KUROCHKIN Mikhail A.

E-mail: kurochkin_ma@spbstu.ru

ДОМРАЧЕВ Денис Антонович

DOMRACHEV Denis A.

E-mail: domrachev.mail@gmail.com

ПРОХОРОВ Максим Викторович

PROKHOROV Maksim V.

E-mail: maksimilian93@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.02.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

DOI: 10.18721/JCSTCS.10106

УДК 62-523.2:004.896

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ 3DOF ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ

Р.А. Ганин¹, Д.В. Казунин²

¹ АО «Кронштадт Технологии»

Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены базовые алгоритмы управления 3DOF динамической платформы тренажеров автотранспорта и спецтехники. Согласно кинематической схеме 3DOF платформы с кривошипно-шатунным механизмом привода звеньев выведены уравнения прямой и обратной задач кинематики, построена ограничительная характеристика рабочей зоны платформы. Проведены исследования алгоритмов управления в пространстве обобщенных координат и координат платформы.

Ключевые слова: платформа подвижности; тренажеры авто- и спецтехники; рабочая зона; регулятор положения; обратная задача кинематики.

CONTROL ALGORITHMS FOR THE 3DOF DYNAMIC MOTION PLATFORM

R.A. Ganin¹, D.V. Kazunin²

¹ Kronshtadt Technologies

St. Petersburg, Russian Federation;

² St. Petersburg State University

St. Petersburg, Russian Federation

In this paper, basic control strategies of the 3DOF dynamic motion platform for vehicle simulators are considered. The significance of the motion platform in automotive and special vehicle simulators is emphasized in the beginning of the article. According to the kinematics of the 3DOF motion platform with crank gears, forward and inverse kinematics equations are obtained. The workspace of the platform is calculated from the forward kinematics equations and presented as a 3D-figure in platform space. The algorithm of trajectory-planning with respect to the obtained workspace is introduced. Experimental research of the controller in the task space and joint space is conducted. In conclusion, further research problems in this area are discussed.

Keywords: motion platform; vehicle simulations; workspace; position controller; inverse kinematics problem.

Одним из важных компонентов динамического тренажера автотранспорта и спецтехники (АТ и СТ) является система подвижно-

сти (СП), предназначенная для выработки у обучаемого необходимых моторных навыков в процессе управления техникой. Применяе-

мые в большинстве тренажеров системы подвижности представляют собой манипулятор параллельного типа, состоящий из подвижной платформы, связанной с неподвижным основанием одним или несколькими поступательными звеньями. В зависимости от требований к имитируемым эффектам, используются платформы с числом степеней свободы от одного до шести [6, 7].

В подавляющем большинстве тренажеров АТ и СТ (~70–80 % продукции ведущих производителей тренажерных систем) применяются системы подвижности 2DOF и 3DOF с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) привода звеньев, обеспечивающие обработку необходимых при имитации данной техники координат подвижной платформы (крен, тангаж, высота) [5].

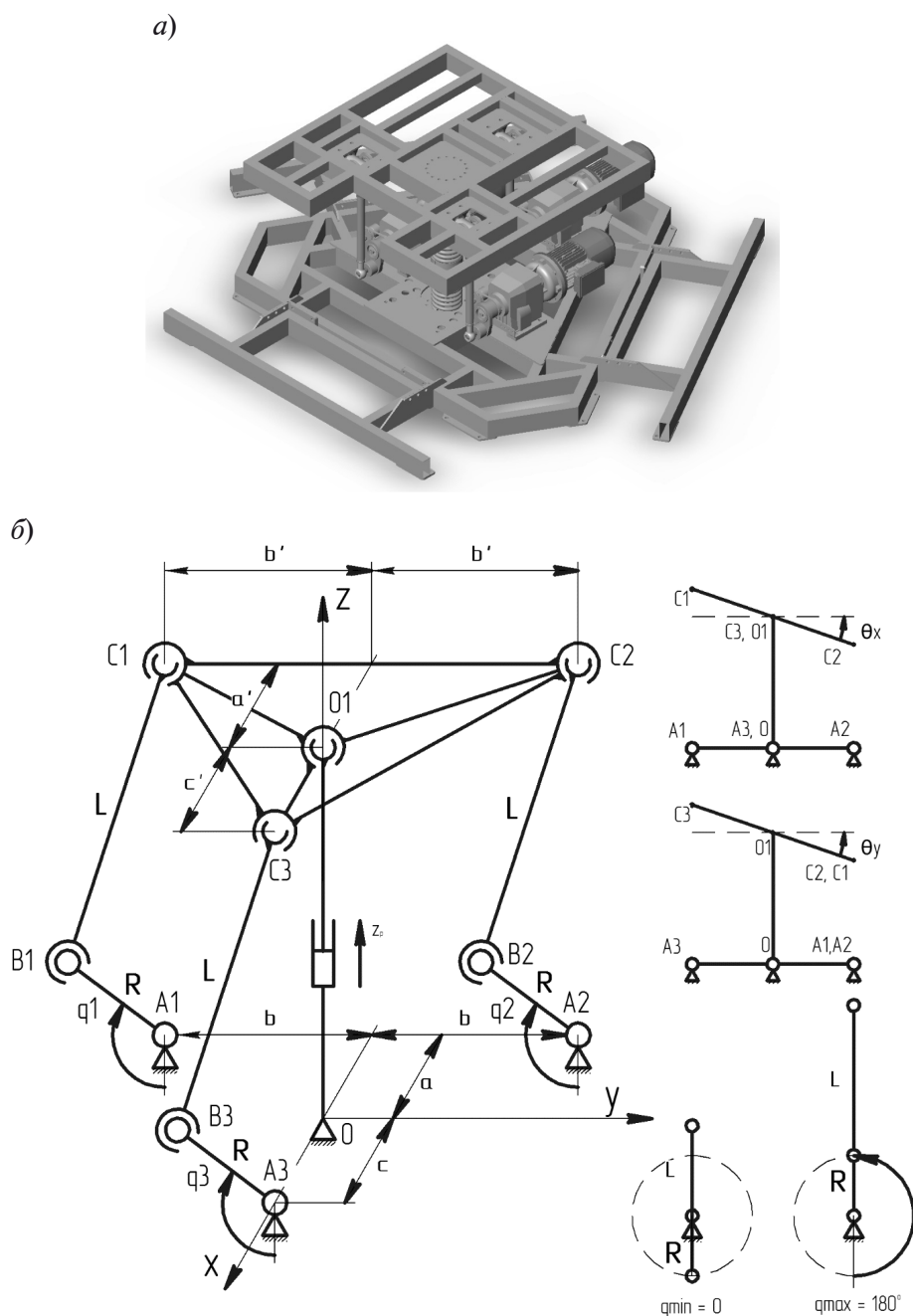


Рис. 1. 3D-модель СП 3DOF (а) и ее кинематическая схема (б)

При разработке ПО управления универсальной системой подвижности (УСП) необходимо учитывать такие факторы, как геометрические параметры платформы, рабочая зона имитационной площадки, массогабаритные характеристики платформы в различных положениях, алгоритмы управления положением привода, протоколы обмена с датчиками и исполнительными устройствами [1–4].

Постановка задачи

На рис. 1 *а* изображена кинематическая схема 3DOF платформы со следующими геометрическими параметрами:

длина кривошипа $R = A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3$;

длина шатуна $L = B_1C_1 = B_2C_2 = B_3C_3$;
расстояния от точки O до точек крепления кривошипов к стойке $a = x_{A2} = x_{A1}$,
 $b = y_{A2} = y_{A1}$, $c = x_{A3}$;

расстояния от точки O_1 до точек крепления карданов к подвижной платформе $a' = x_{C1} = x_{C2}$, $b' = y_{C2} = y_{C2}$, $c' = x_{C3}$.

Для решения задачи управления положением платформы предложены две базовых структуры системы управления подвижности 3DOF, представленные на рис. 2.

Условно обозначим вариант системы управления, изображенный на рис. 2 *а*, как «система 1», а вариант, изображенный на рис. 2 *б* – как «система 2».

В состав системы 1 входят:

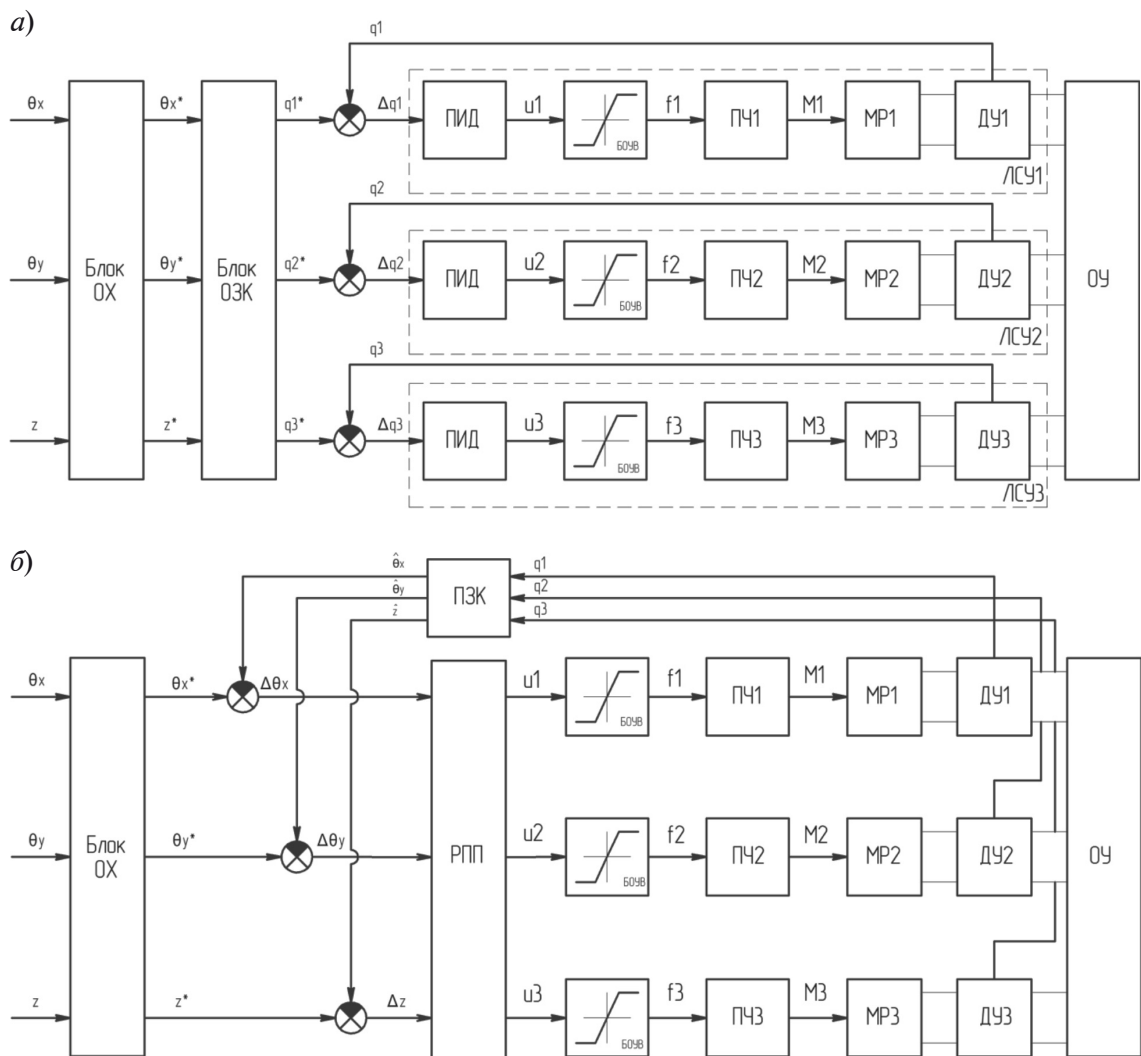


Рис. 2. Структурная схема системы управления в пространстве обобщенных координат q_1^*, q_2^*, q_3^* (а) и в пространстве координат платформы $\theta_x^*, \theta_y^*, z_p^*$ (б)

блок ограничительной характеристики (ОХ), осуществляющий проверку корректности значений задаваемых координат платформы (крен — θ_x , тангаж — θ_y , подъем — z_p) с целью обеспечения возможности их достижения с помощью данной системы подвижности;

блок решения обратной задачи кинематики (ОЗК), осуществляющий преобразование прошедших предварительную обработку координат платформы θ_x^* , θ_y^* , z_p^* в углы поворота КШМ q_1^* , q_2^* , q_3^* ;

локальные системы управления (ЛСУ) углами поворота КШМ, включающие: ПИД-регуляторы, блоки ограничения управляющих воздействий (БОУВ), преобразователи частоты (ПЧ), датчики угла (ДУ) поворота мотор-редукторов, мотор-редукторы (МР) приводных звеньев;

объект управления (ОУ).

В состав системы 2 дополнительно входят:

блок прямой задачи кинематики (ПЗК), осуществляющий преобразование измеряемых обобщенных координат q_1, q_2, q_3 в текущие координаты платформы θ_x, θ_y, z_p ;

регулятор положения платформы (РПП), производящий расчет скоростей $u_1 = \dot{q}_1$, $u_2 = \dot{q}_2$, $u_3 = \dot{q}_3$ (частот вращения f_1, f_2, f_3) МР, исходя из ошибок позиционирования $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta z_p$.

БОУВ как для системы 1, так и для системы 2 дополнительно осуществляют масштабирование выходов регуляторов u_1, u_2, u_3 в частоты f_1, f_2, f_3 для корректности задания частоты вращения, передаваемой на ПЧ.

Перейдем к описанию базовых алгоритмов представленной на рис. 2 системы управления.

Ограничительная зона динамической платформы

Ограничительная характеристика строится исходя из заданных ограничений на углы поворота КШМ. Для 3DOF платформы с КШМ рабочий диапазон изменения углов поворота КШМ составляет $q_i = [0; 180^\circ]$, $i = 1, \dots, n$, где n — число степеней свободы. Таким образом, область допустимых значений углов КШМ $\{\bar{q} : q_i \in [0; 180^\circ], i = 1, n\}$ представляет собой куб со стороной 180° ,

построенный из начала координат.

В общем случае, каждая из координат θ_x, θ_y, z_p имеет естественные ограничения, определяемые геометрическими размерами a, b, c, R, L . Так, предельные значения вертикального перемещения z_p относительно точки О составляют:

$$z_{p\min} = L - R; z_{p\max} = L + R. \quad (1)$$

Исходя из предположения, что для крайних положений платформы смещения точек С1, С2, С3 по оси x малы, предельные угловые перемещения $\theta_{x\min}, \theta_{x\max}, \theta_{y\min}, \theta_{y\max}$, а также предельные совместные угловые перемещения $\theta_{xy\min}$ и $\theta_{xy\max}$ можно получить исходя из геометрических соображений:

$$\theta_{x\min} = -\arcsin\left(\frac{R}{b}\right); \theta_{x\max} = \arcsin\left(\frac{R}{b}\right);$$

$$\theta_{y\min} = -\arcsin\left(\frac{2R}{a+c}\right);$$

$$\theta_{y\max} = \arcsin\left(\frac{2R}{a+c}\right); \quad (2)$$

$$\theta_{xy\min} = -\arccos\left(\frac{R(a+c)}{\sqrt{(a+c)^2(R^2+b^2)+R^2b^2}}\right);$$

$$\theta_{xy\max} = \arccos\left(\frac{R(a+c)}{\sqrt{(a+c)^2(R^2+b^2)+R^2b^2}}\right).$$

Однако полученные значения определяют лишь часть точек ограничительной характеристики. Оставшиеся граничные точки рассчитаем с помощью прямой задачи кинематики (ПЗК):

$$\begin{cases} F_1(X) = (b \sin \theta_x \sin \theta_y - a \cos \theta_y + a)^2 + \\ + (b \cos \theta_x + b - R \sin q_1)^2 + \\ + (z_p + a \sin \theta_y + b \cos \theta_y \sin \theta_x + \\ + R \cos q_1)^2 - L^2 = 0; \\ F_2(X) = (-a \cos \theta_y - b \sin \theta_x \sin \theta_y + a)^2 + \\ + (b \cos \theta_x + b + R \sin q_2)^2 + \\ + (z_p + a \sin \theta_y - b \cos \theta_y \sin \theta_x + \\ + R \cos q_2)^2 - L^2 = 0; \\ F_3(X) = (c \cos \theta_y - c)^2 + (-R \sin q_3)^2 + \\ + (z_p - c \sin \theta_y + R \cos q_3)^2 - L^2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

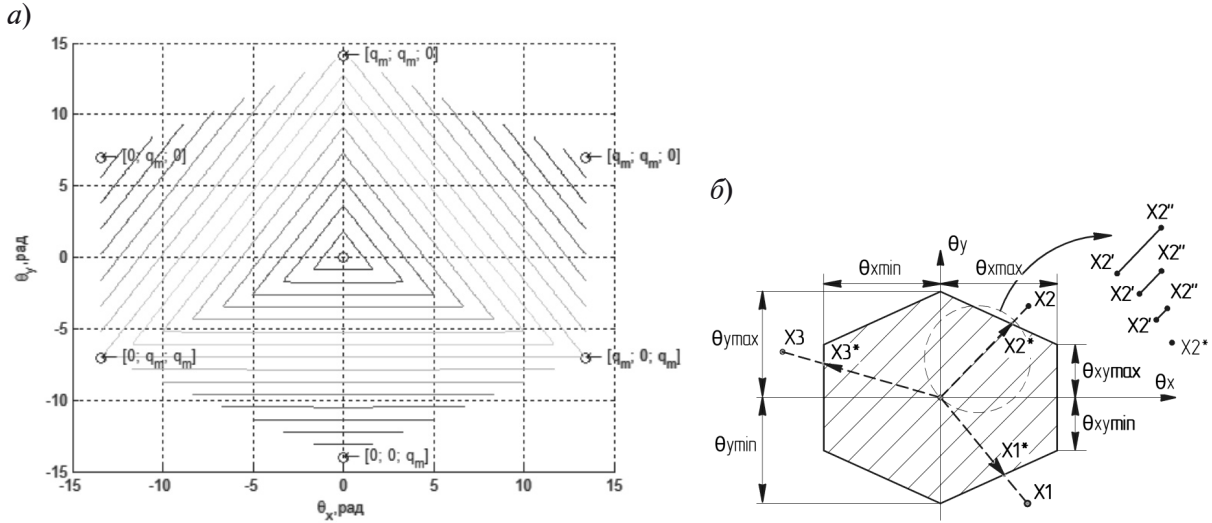


Рис. 3. Ограничительная зона работы 3DOF подвижности

ПЗК формулируется следующим образом: для заданных обобщенных координат q определить вектор X перемещений платформы, решив систему $F(X) = 0$. Формула (3) получена на основании аналитического решения ОЗК (формулы (5)–(7)).

Для решения системы уравнений (3) применим рекуррентную формулу метода Ньютона, преобразованную к виду системы линейных алгебраических уравнений:

$$J(X^k) \cdot \Delta X^k = -F(X^k)$$

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k, k = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

$$|X^{k+1} - X^k| < \varepsilon$$

где N – ограничение на число итераций; ε – допустимая погрешность вычислений.

Результат построения ограничительной характеристики представлен на рис. 3 а в виде линий уровня функции $z_p = f(\theta_x, \theta_y)$. Символом q_m обозначено предельное значение соответствующей обобщенной координаты.

В следящем режиме работы заданные координаты платформы необходимо ограничивать перед передачей на блок решения ОЗК, т. е. значения заданных координат X , находящиеся за границами возможностей платформы, должны быть «притянуты» к границам ограничительной характеристики. Для определения точки, ближайшей к границе ограничительной зоны, используется алгоритм, проиллюстрированный на рис. 3 б.

Алгоритм функционирует следующим

образом. Строится ограничительная характеристика при $z_p = \text{const}$. Если заданная точка X_2 находится за пределами области допустимых перемещений, производится поиск допустимого решения на отрезке OX_2 путем его деления в пропорции золотого сечения. На каждом шаге данного алгоритма решается ОЗК для очередной точки внутри малого отрезка $X_2'X_2''$ после чего проверяется условие останова. При достижении заданной точности искомая точка X_2^* передается на блок ОЗК.

Формулировка ОЗК

В ходе решения ОЗК необходимо определить вектор q обобщенных координат по заданному вектору положения платформы $X = (\theta_x^*, \theta_y^*, z_p^*)^T$. Для вывода уравнений ОЗК выразим координаты точек C1, C2, C3 через углы крена и тангажа:

$$\begin{pmatrix} x_{C1} \\ y_{C1} \\ z_{C1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x^* & -\sin \theta_x^* \\ 0 & \sin \theta_x^* & \cos \theta_x^* \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos \theta_y^* & 0 & \sin \theta_y^* \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y^* & 0 & \cos \theta_y^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -a \\ -b \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_p^* \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} x_{C2} \\ y_{C2} \\ z_{C2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x^* & -\sin \theta_x^* \\ 0 & \sin \theta_x^* & \cos \theta_x^* \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \begin{pmatrix} \cos \theta_y^* & 0 & \sin \theta_y^* \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y^* & 0 & \cos \theta_y^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -a \\ b \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_p^* \end{pmatrix}; \\ & \begin{pmatrix} x_{C3} \\ y_{C3} \\ z_{C3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x^* & -\sin \theta_x^* \\ 0 & \sin \theta_x^* & \cos \theta_x^* \end{pmatrix} \times \\ & \times \begin{pmatrix} \cos \theta_y^* & 0 & \sin \theta_y^* \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y^* & 0 & \cos \theta_y^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_p^* \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее определяем координаты точек B1, B2, B3:

$$\begin{aligned} (x_{B1} - x_{C1})^2 + (y_{B1} - y_{C1})^2 + (z_{B1} - z_{C1})^2 &= L; \\ (x_{B2} - x_{C2})^2 + (y_{B2} - y_{C2})^2 + (z_{B2} - z_{C2})^2 &= L; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_1^* &= -2 \arctg \frac{4R^2(y_{C1} + b)^2 \pm \sqrt{4R^2(z_{C1}^2 + (y_{C1} + b)^2) - ((x_{C1} + a)^2 + (y_{C1} + b)^2 + z_{C1}^2 + R^2 + L^2)^2}}{(x_{C1} + a)^2 + (y_{C1} + b)^2 + (1 - 4R^2)z_{C1}^2 + R^2 + L^2}; \\ q_2^* &= -2 \arctg \frac{4R^2(y_{C2} - b)^2 \pm \sqrt{4R^2(z_{C2}^2 + (y_{C2} - b)^2) - ((x_{C2} + a)^2 + (y_{C2} - b)^2 + z_{C2}^2 + R^2 + L^2)^2}}{(x_{C2} + a)^2 + (y_{C2} - b)^2 + (1 - 4R^2)z_{C2}^2 + R^2 + L^2}; \quad (8) \\ q_3^* &= -2 \arctg \frac{4R^2y_{C3}^2 \pm \sqrt{4R^2(z_{C3}^2 + y_{C3}^2) - ((x_{C3} - c)^2 + y_{C3}^2 + z_{C3}^2 + R^2 + L^2)^2}}{(x_{C3} - c)^2 + y_{C3}^2 + (1 - 4R^2)z_{C3}^2 + R^2 + L^2}, \end{aligned}$$

где значения координат x_{C1} , y_{C1} , z_{C1} , x_{C2} , y_{C2} , z_{C2} , x_{C3} , y_{C3} , z_{C3} определяются по формуле (5) как функции $f(\theta_x^*, \theta_y^*, z_p^*)$.

Выбором знака «+» или «-» в (8) можно задать вращение кривошипа в левой ($q_i < 0$) или в правой ($q_i > 0$) полуплоскости yOz . С точки зрения позиционирования подвижной платформы оба решения уравнения являются эквивалентными.

Регулятор положения платформы (РПП)

Для реализации контуров положения ЛСУ системы 1, замкнутых обратными связями, целесообразно применить ПИД-регулятор с ограничением по управляющим воздействиям (скоростям) $u_1 = \dot{q}_1$, $u_2 = \dot{q}_2$, $u_3 = \dot{q}_3$ вследствие простоты его реализации и приемлемого качества переходных процессов. Путем настройки коэффициентов регулятора достигаются требуемые характеристики переходных

$$(x_{B3} - x_{C3})^2 + (y_{B3} - y_{C3})^2 + (z_{B3} - z_{C3})^2 = L. \quad (6)$$

Так как кривошипы вращаются в плоскости yOz , справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} x_{A1} &= x_{B1} & y_{B1} &= -b + R \sin q_1^*, \\ z_{B1} &= -R \cos q_1^*; \\ x_{A2} &= x_{B2} & y_{B2} &= b + R \sin q_2^*, \\ z_{B2} &= -R \cos q_2^*; \\ x_{A3} &= x_{B3} & y_{B3} &= R \sin q_3^*, \\ z_{B3} &= -R \cos q_3^*. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) и дополнительных преобразований окончательно получаем:

процессов в контурах ЛСУ при реакции на типовые сигналы задания как для каждого контура в отдельности, так и при совместной работе в пределах ограничительной характеристики (рис. 3 б).

Рассмотрим контур верхнего уровня системы 2, замкнутый обратными связями по координатам платформы. Исходя из предположения, что объект представим в виде линейной модели шестого порядка, применим метод синтеза регулятора состояния, используемый в теории линейных систем автоматического управления. Для этого определим $x = [\theta_x \ \theta_y \ z_p \ \dot{\theta}_x \ \dot{\theta}_y \ \dot{z}_p]^T$ – вектор переменных состояния; $u = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]^T$ – вектор входов объекта. Вектор задающих воздействий обозначим как $y^* = [\theta_x^* \ \theta_y^* \ z_p^* \ \dot{\theta}_x^* \ \dot{\theta}_y^* \ \dot{z}_p^*]^T$, тогда вектор ошибки управления $\Delta y = y^* - \hat{y}$, где $\hat{y} = [\hat{\theta}_x \ \hat{\theta}_y \ \hat{z}_p \ \hat{\dot{\theta}}_x \ \hat{\dot{\theta}}_y \ \hat{\dot{z}}_p]^T$. Окончательно закон управления регулятора состояния



будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B \\ y = C_{6 \times 6} \cdot x, \quad c_{ij} = 1; i, j = \overline{1..6} \\ u = K \cdot \Delta y \end{cases} \quad (9)$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{\theta_x \rightarrow \dot{q}_1} & K_{\theta_y \rightarrow \dot{q}_1} & K_{z_p \rightarrow \dot{q}_1} & K_{\dot{\theta}_x \rightarrow \dot{q}_1} & K_{\dot{\theta}_y \rightarrow \dot{q}_1} & K_{\dot{z}_p \rightarrow \dot{q}_1} \\ K_{\theta_x \rightarrow \dot{q}_2} & K_{\theta_y \rightarrow \dot{q}_2} & K_{z_p \rightarrow \dot{q}_2} & K_{\dot{\theta}_x \rightarrow \dot{q}_2} & K_{\dot{\theta}_y \rightarrow \dot{q}_2} & K_{\dot{z}_p \rightarrow \dot{q}_2} \\ K_{\theta_x \rightarrow \dot{q}_3} & K_{\theta_y \rightarrow \dot{q}_3} & K_{z_p \rightarrow \dot{q}_3} & K_{\dot{\theta}_x \rightarrow \dot{q}_3} & K_{\dot{\theta}_y \rightarrow \dot{q}_3} & K_{\dot{z}_p \rightarrow \dot{q}_3} \end{pmatrix}$$

$$K_{\theta_x \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{\theta_{x \max}}; K_{\theta_y \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{\theta_{y \max}}; K_{z_p \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{z_{p \max}}; K_{\dot{\theta}_x \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{\dot{\theta}_{x \max}}; K_{\dot{\theta}_y \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{\dot{\theta}_{y \max}}; K_{\dot{z}_p \rightarrow \dot{q}_i}^0 = \frac{\Delta \dot{q}_i}{\dot{z}_{p \max}},$$

где $K_{\theta_x}^0, K_{\theta_y}^0, K_{z_p}^0, K_{\dot{\theta}_x}^0, K_{\dot{\theta}_y}^0, K_{\dot{z}_p}^0$ — начальные значения коэффициентов матрицы обратных связей; $\Delta \dot{q}$ — предельное значение обобщенной скорости (рад/с).

Для получения матриц A и B могут применяться различные методы (идентификация объекта управления, линеаризация уравнений, описывающих объект управления), однако в данной работе этот этап пропущен, т. к. уточнение коэффициентов матрицы K можно осуществить на основании данных эксперимента путем подачи простых тестовых воздействий, не прибегая к использованию полной модели ОУ.

Несмотря на то, что коэффициенты матрицы управления C приняты равными единице, прямое измерение вектора состояний затруднено, поэтому для получения текущих координат применяется прямая задача кинематики (3)–(4) и численное дифференцирование по времени векторов y^* и y .

Для оценки качества переходных и установившихся процессов в системе воспользуемся критерием минимума среднего квадрата ошибки:

$$J = \frac{\int_0^{T_{\text{уст}}} (c_1 e_{\theta_x}^2 + c_2 e_{\theta_y}^2 + c_3 e_{z_p}^2) dt}{T_{\text{уст}}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где c_1, c_2, c_3 — нормирующие коэффициенты; $e_{\theta_x}, e_{\theta_y}, e_{z_p}$ — ошибки регулирования по θ_x, θ_y, z_p соответственно.

Данный критерий выбран исходя из основного назначения СП в составе тренажерного комплекса — движение по задан-

ной траектории, формируемой математической моделью техники. Математическая модель АТ и СТ отвечает за корректный расчет параметров акселерационных воздействий на рабочем месте оператора, на основании которых формируется траектория движения СП. К системе управления СП при этом предъявляются следующие требования:

запаздывание в режиме слежения должно составлять не более 200 мс;

отсутствие перерегулирования;

устойчивость при отработке задающих воздействий в диапазоне частот до 1 Гц.

Имитационные эффекты движения тренажеров АТ и СТ достаточно разнообразны, однако наиболее характерным случаем является движение техники по местности с характерными неровностями рельефа, которые имитируются на СП колебаниями малой частоты по углам крена и тангажа вокруг исходной точки $(\theta_x, \theta_y, z_p) = (0, 0, L)$. Дополнительно накладывается высокочастотная составляющая колебаний, амплитуда которой зависит от типа грунта, по которому движется транспортное средство.

Результаты испытаний

Рассмотренные выше варианты решения задачи управления положением платформы были испытаны на стенде тренажера БТР-82А.

В таблице приведены результаты испытаний по отработке простых синусоидальных воздействий следующего вида:

Значение критерия для синусоидальных воздействий различной частоты

Частота задающего воздействия f , Гц	J_1	J_2
0,1	0,0083	0,0096
0,2	0,0096	0,0109
0,3	0,0112	0,0126
0,4	0,0130	0,0143
0,5	0,0150	0,0159
0,6	0,0171	0,0174
0,7	0,0192	0,0188
0,8	0,0217	0,0205
0,9	0,0260	0,0251

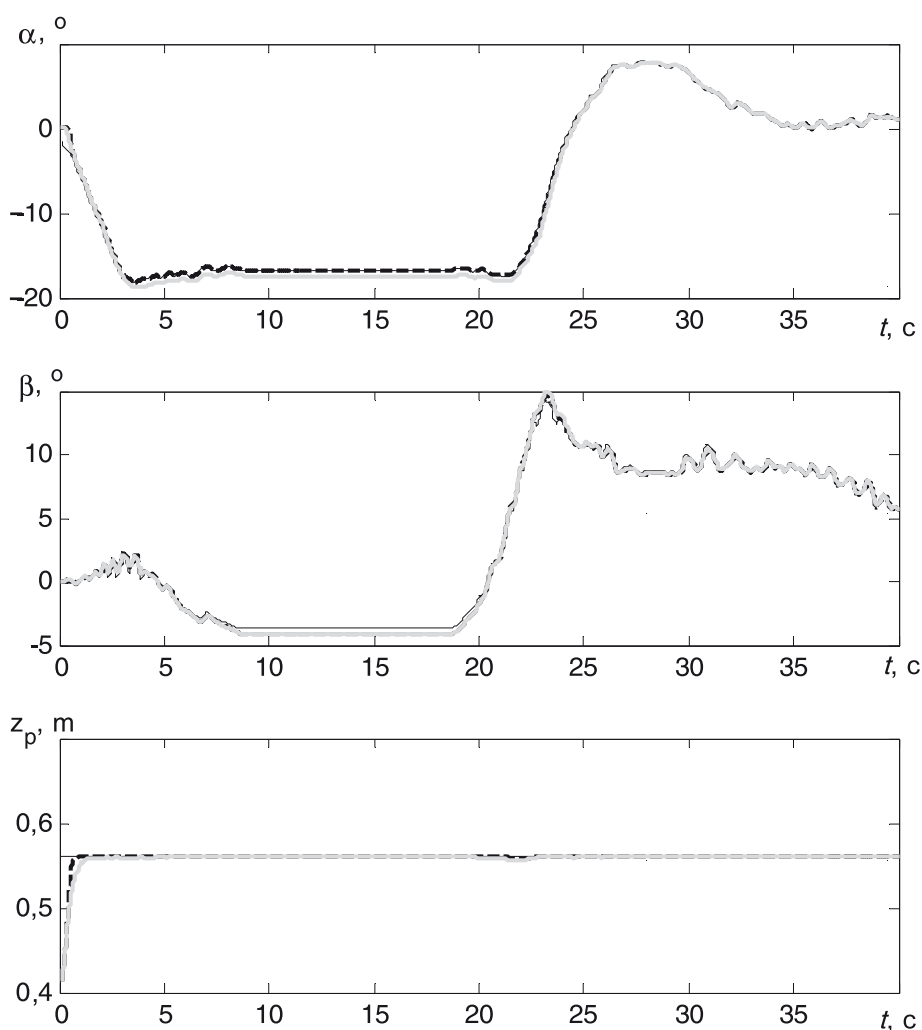


Рис. 4. Графики отработки задающих воздействий 3DOF платформы для системы 1 и системы 2
(—) уставка; (-----) система 1; (—) система 2



$$\begin{aligned}\theta_x(t) &= \theta_x^\circ \sin(2\pi ft), \\ \theta_y(t) &= \theta_y^\circ \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right), z_p = L.\end{aligned}\quad (11)$$

Для амплитуды колебаний $\theta_x^\circ = \theta_y^\circ = 10^\circ$ значение критерия J , удовлетворяющее перечисленным выше требованиям к системе, находится в пределах $J < 0,03$.

Для сравнения систем 1 и 2 по критерию J были подобраны эквивалентные настройки регуляторов.

На рис. 4 представлены графики процессов при обработке траектории движения техники.

Сравнивая кривые для системы 1 и 2 и данные таблицы можно прийти к выводу, что обработка задающих воздействий в следящем режиме в обоих случаях происходит схожим образом, однако на больших частотах сигнала задания система 2 лучше компенсирует отклонения ошибки по скорости за счет влияния коэффициентов обратной связи. Система 2 также выгодно отличается большими возможностями настройки. Так, можно уменьшить коэффициенты по осям θ_x , и θ_y для более плавной обработки низкочастотных сигналов или обнулить коэффи-

циент для z_p для задействования большего объема рабочей зоны.

Разработаны алгоритмы управления 3DOF динамической платформой подвижности, позволяющие достичь требуемого качества переходных процессов при обработке имитационных эффектов движения, используемых в тренажерах авто- и спецтехники с целью реализации тактильной обратной связи. Для решения задачи позиционирования реализованы и испытаны на практике два подхода: управление в пространстве обобщенных координат приводных звеньев и управление в пространстве координат платформы.

В качестве основного алгоритма управления выбран подход, базирующийся на решении обратной задачи кинематики. Для устранения выявленных недостатков данного метода были применены алгоритмы, учитывающие текущее положение и динамику платформы, которые позволили воспроизвести как эффекты движения автотранспорта и спецтехники по рельефу местности, так и обратные тактильные воздействия, максимально приближенные к реальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 96 с.
2. Merlet J.-P. *Parallel robots*. Sophia-Antipolis, France: Springer, 2006. 417 p.
3. Ростов Н.В. Анализ алгоритмов решения обратных задач кинематики в системах управления движением роботов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управления. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. № 5(205). С. 93–98
4. Юревич Е.И. Основы робототехники: Учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
5. Костыгова Д.М., Казунин Д.В., Ганин Р.А., Кузнецов Н.В. Имитационное воспроизведение

движений тяжелых карьерных экскаваторов // Тезисы докл. Междунар. науч. конф. по механике «Седьмые поляховские чтения». СПб., 2015. С. 216.

6. Leonov G.A., Zegzhda S.A., Zuev S.M., Ershov B.A., Kazunin D.V., Kostygova D.M., Kuznetsov N.V., Tovstik P.E., Tovstik T.P., Yushkov M.P. Dynamics and Control of the Stewart Platform // *Doklady Akademii Nauk*. 2014. Vol. 458. No. 1. Pp. 36–41.

7. Альван Х.М., Слоущ А.В. Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности // Теория механизмов и машин. Динамика машин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2003. № 1. С. 63.

REFERENCES

1. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow: Nauka Publ., 1991, 96 p. (rus)
2. Merlet J.-P. *Parallel robots*, Sophia-Antipolis, France: Springer, 2006, 417 p.

3. Rostov N.V. Analiz algoritmov resheniya obratnykh zadach kinematiki v sistemakh upravleniya dvizheniyem robotov [Algorithm Analysis for Solving the Inverse Kinematic Problems in Robot Motion Control Systems]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika*.

Telekommunikatsii. Upravleniya [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2014, No. 5(205), Pp. 93–98. (rus)

4. **Yurevich Ye.I.** *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics]. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2005, 416 p. (rus)

5. **Kostygova D.M., Kazunin D.V., Ganin R.A., Kuznetsov N.V.** Imitatsionnoye vosproizvedeniye dvizheniy tyazhelykh karyernykh ekskavatorov [Imitating reproduction of movement of heavy mining excavators]. *Sedmyye polyakhovskiyechteniya, Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po mekhanike* [Abstracts of

the international scientific conference on mechanics “Seventh polyakhovskie reading”], St. Petersburg, 2015, P. 216. (rus)

6. **Leonov G.A., Zegzhda S.A., Zuev S.M., Ershov B.A., Kazunin D.V., Kostygova D.M., Kuznetsov N.V., Tovstik P.E., Tovstik T.P., Yushkov M.P.** Dynamics and Control of the Stewart Platform. *Doklady Akademii Nauk*, 2014, Vol. 458, No 1, Pp. 36–41. (rus)

7. **Alvan Kh.M., Sloushch A.V.** Ob upravlenii dvizheniyem prostranstvennoy platformy s neskolkimi stepenyami podvizhnosti. *Teoriya mekhanizmov i mashin. Dinamika mashin*, St. Petersburg: Politekhn. un-t Publ., 2003, No. 1, P. 63. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ГАНИН Роман Андреевич

GANIN Roman A.

E-mail: ra_ganin@mail.ru

КАЗУНИН Дмитрий Владимирович

KAZUNIN Dmitry V.

E-mail: _dvk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2016

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017

Federated Conference on Computer Science and Information Systems

Prague, Czech Republic
3-6 September, 2017



Events of FedCSIS 2017

■ AAIA'17 - 12th International Symposium Advances in Artificial Intelligence and Applications

- AIMaVIG'17 - 3rd International Workshop on Artificial Intelligence in Machine Vision and Graphics
- AIMA'17 - 7th International Workshop on Artificial Intelligence in Medical Applications
- AIRIM'17 - 2nd International Workshop on AI aspects of Reasoning, Information, and Memory
- ASIR'17 - 7th International Workshop on Advances in Semantic Information Retrieval
- LTA'17 - 2nd International Workshop on Language Technologies and Applications
- WCO'17 - 10th International Workshop on Computational Optimization

■ CSS - Computer Science & Systems

- AIPC'17 - 2nd International Workshop on Advances in Image Processing and Colorization
- BigDAISy'17 - 1st Workshop on Big Data Analytics for Information Security
- CANA'17 - 10th Computer Aspects of Numerical Algorithms
- CPORA'17 - 2nd Workshop on Constraint Programming and Operation Research Applications
- C&SS'17 - 4th International Conference on Cryptography and Security Systems
- MMAP'17 - 10th International Symposium on Multimedia Applications and Processing
- WSC'17 - 9th Workshop on Scalable Computing
- WAPL'17 - 6th Workshop on Advances in Programming Languages

■ JAWS - Joint Agent-oriented Workshops in Synergy

- ABC-MI'17 - 11th Workshop on Agent Based Computing: from Model to Implementation
- MAS&S'17 - 11th International Workshop on Multi-Agent Systems and Simulations
- SEN-MAS'17 - 5th International Workshop on Smart Energy Networks & Multi-Agent Systems

■ SSD&A - Software Systems Development & Applications

- IoTM'17 - 1st Workshop on Internet of Things, Process Modelling and Microservices
- IWCPs'17 - 4th International Workshop on Cyber-Physical Systems
- MIDI'17 - 4th Conference on Multimedia, Interaction, Design and Innovation
- SEW'17 - The 37th IEEE Software Engineering Workshop
- LASD'17 - 1st International Conference on Lean and Agile Software Development

■ IT4MBS - Information Technology for Management, Business & Society

- ABICT'17 - 8th International Workshop on Advances in Business ICT
- AITM'17 - 115th Conference on Advanced Information Technologies for Management
- TAMHE'17 - 1st Workshop on Technology Enhanced Medical and Healthcare Education
- WGSEE'17 - 1st Workshop on Gamification Software for Education and Enterprises
- ISM'17 - 12th Conference on Information Systems Management
- IT4L'17 - 5th Workshop on Information Technologies for Logistics
- KAM'17 - 23rd Conference on Knowledge Acquisition and Management
- UHH'17 - 3rd International Workshop on Ubiquitous Home Healthcare

■ iNetSapp - International Conference on Innovative Network Systems and Applications

- CAP-NGNCS'17 - 1st International Workshop on Communications Architectures and Protocols for the New Generation of Networks and Computing Systems
- INSERT'17 - 1st International Conference on Security, Privacy, and Trust
- IoT-ECAW'17 - 1st Workshop on Internet of Things - Enablers, Challenges and Applications
- SoFAST-WS'17 - 6th International Symposium on Frontiers in Network Applications, Network Systems and Web Services
- WSN'17 - 6th International Conference on Wireless Sensor Networks

■ DS-RAIT'17 - 4th Doctoral Symposium on Recent Advances in Information Technology



www.fedcsis.org
secretariat@fedcsis.org

Important Dates:

Paper submission: **May 10, 2017**

Position paper submission: **May 31, 2017**

Authors notification: **June 14, 2017**

Final paper submission and registration: **June 28, 2017**

Final deadline for discounted fee: **August 01, 2017**

Conference dates: **September 3-6, 2017**

FedCSIS is organized by:



IEEE Xplore®
DIGITAL LIBRARY

Proceedings will be submitted for indexing by:



In cooperation with:



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

Том 10, № 1, 2017

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 31.03.2017. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 10,46. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала — 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук — 8–15 страниц формата А-4; аспирантов — 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул — в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт — **TNR**, размер шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева — 3 см, сверху, снизу — 2,5 см, справа — 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru