

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 004.77

В.С. Заборовский, М.Ю. Гук, В.А. Мулюха, А.С. Ильяшенко

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С БОРТА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

V.S. Zaborovsky, M.Yu. Guk, V.A. Muliukha, A.S. Ilyashenko

NETWORK-CENTRIC APPROACH TO CREATING A REMOTE CONTROL SYSTEM FOR A ROBOTIC OBJECT FROM A BOARD OF AN ORBITAL STATION

Рассмотрен сетевый подход к развитию концепции «internet of things» на примере создания системы удаленного интерактивного управления робототехническими объектами. Рассматриваемый подход апробирован в серии космических экспериментов, проводимых специалистами ЦНИИ РТК и СПбГПУ. Для описания сетевой инфраструктуры предложено использовать иерархический подход, позволяющий выделить три уровня процессов информационного взаимодействия сетевых объектов, в частности, напланетных роботов и человека-оператора. Подробно изучен второй, мезоскопический уровень, описывающий информационно-транспортные процессы, связанные с формированием виртуальных соединений с требуемым уровнем качества передачи данных, в частности, к величинам задержек передачи пакетов, при которых реализуется режим телеприсутствия оператора в зоне выполнения операций.

УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ; СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП; СЕТЕВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА; ДИНАМИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ; СИЛОМОМЕНТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ.

The article focuses on the network-centric approach to the development of the «internet of things» concept by creating an interactive remote control system for robotic objects. This approach was used in a series of space experiments conducted by specialists of Center for Robotics and Technical Cybernetics and SPbGPU. To describe the network infrastructure we propose to use a hierarchical approach which allows to distinguish three levels of information interaction processes between network objects, particularly onsurface robots and human operator. In the paper is proposed the second mesoscopic level that describes informational transmission processes associated with the formation of virtual connections with the desired level of quality of service, in particular the packet delay values to ensure the telepresence of operator in zone operations.

REMOTE CONTROL; NETWORK-CENTRIC PRINCIPLES; TRANSPORT NETWORK INFRASTRUCTURE; DYNAMIC ADAPTATION; FORCE-TORQUE FEEDBACK.

Современные компьютерные сети могут рассматриваться как информационно-транспортные инфраструктуры, построенные на базе стека протоколов TCP/IP, что позволяет объединить в единую иерархическую мультисервисную среду различные

объекты управления, образуя т. н. *internet of things* [1, 2]. Такой подход применительно к созданию систем удаленного управления робототехническими объектами имеет ряд важных преимуществ, среди которых можно выделить масштабируемость, на-

дежность, адаптируемость. Эти качества особенно важны при создании систем удаленного управления напланетными роботами с борта пилотируемой орбитальной станции (ПОС).

Сетецентрический подход по отношению к решаемой задаче управления предполагает наличие иерархической структуры организации информационно-логической связанности роботов в мультипротокольную виртуальную сеть многоцелевых операций. Верхний макроскопический уровень описывает логическую и информационную связанность всей робототехнической системы на уровне прикладных и пользовательских сервисов. Этот уровень отвечает за организацию информационной связанности компонентов системы путем формирования мезообъектов – виртуальных соединений между роботами, отвечающих требованиям качества потоков данных между различными элементами распределенной системы. Другой задачей верхнего уровня является анализ целевой функции сложной операции, формирование последовательности более простых целей для реализации сложной операции и контроля их выполнения.

Данная статья посвящена исследованию алгоритмов и протоколов мезоскопического уровня, отвечающего за формирование виртуальных соединений, характеристики которых соответствуют требованиям качества информационных потоков напланетных роботов, необходимых для реализации режима телеприсутствия космонавта на борту ПОС. Под качеством передачи данных понимается ограничение на пропускную способность виртуального соединения, задержку передачи данных, в рамках такой связи, а также вероятность потери пакетов, формирующих данное соединение. Использование данной абстракции позволяет расширить возможности применения сетей пакетной коммутации с учетом задержек и потерь в каналах передачи информации, например для силомоментного очувствления процессов телеуправления. Представленный в статье сетецентрический метод управления, относящийся к данному уровню информационного взаимодействия оператора и робототехнического объекта,

основывается на механизмах виртуализации каналов передачи данных и формировании соединений, толерантных к задержкам.

Микроскопический уровень отвечает за организацию передачи сетевого пакетного трафика в динамической сетевой среде при условии обеспечения требуемых характеристик виртуальных соединений, что достигается используемым абсолютным приоритетом в обслуживании вместе с вероятностным вытесняющим механизмом. Подробнее методы обеспечения требуемых характеристик каналов связи рассмотрены в статье «Алгоритмы управления характеристиками потоков пакетных данных в сетевой среде с использованием приоритетного вероятностного выталкивающего механизма» (см. наст. издание), а также в работах [3–6].

В настоящей статье рассматриваются вопросы создания сетецентрического подхода к созданию системы удаленного управления, толерантной к задержкам. Отработка алгоритмов осуществляется с использованием системы интерактивного управления динамическими объектами с борта ПОС. Созданная программная среда предоставляет широкие возможности для отработки предлагаемых алгоритмов управления объектами в реальном масштабе времени. В качестве прикладной задачи в статье исследуется алгоритм динамической настройки силомоментных воздействий задающего манипулятора-джойстика (ЗМ), который используется оператором, находящимся на борту ПОС.

Сетецентрические технологии управления с использованием информационно-транспортной инфраструктуры

Создание сетецентрических систем управления на базе сетевых технологий открывает новый этап в развитии как теории «internet of things», так и практики удаленного управления различными объектами. При этом в системах управления на первый план выходят принципы самоорганизации и адаптации управляемых объектов. Особые условия для реализации таких принципов возникают в тех случаях, когда в конту-

ре управления сетевым объектом находится человек-оператор.

Примером подобной задачи может быть космический эксперимент (КЭ) «Контур 2», особенностью которого является тот факт, что объекты сетевого управления представлены двумя типами роботов, функционирующих в различных режимах, но управляемых с помощью одного устройства – двухкоординатного задающего манипулятора. Это устройство оснащено электроприводами, формирующими регулируемые усилия (моменты) по двум ортогональным осям рукоятки управления. Для управления первым типом роботов используется синхронный канал связи, задержка в котором не превышает 15 мс, а величина дисперсии задержки (джиттера) не более 10 % от значения параметра РТТ. В этом случае оператор может использовать режим билатерального управления роботом [7, 8]. Для управления вторым типом роботов используется виртуальный канал, проходящий через сегмент сети Интернет. Неотъемлемым свойством такого канала является высокое значение величины и дисперсии РТТ, что снижает эффективность использования режима телеприсутствия, но позволяет оператору с помощью обратного усилия на рукоятке ЗМ оценивать свойства сетевой среды, в которой функционирует исполнительный элемент робота. Подобное повышение информативности управления за счет эффекта силомоментного очувствления задержек позволяет оператору корректировать скорость и направления перемещения робота, а с помощью воздействия на рукоятку джойстика – ощущать влияние сетевой среды и формировать оценку задержки данных в каналах связи КЭ «Контур-2», которые включают в себя:

- асимметричный радиоканал S-band, обеспечивающий передачу данных между бортом МКС и наземной приемной станцией, расположенной на территории Германии, и обеспечивающий сеанс связи на протяжении 9-10 мин (256 кбит/с от Земли к МКС и 4 Мбит/с от МКС к Земле);
- цифровую синхронную линию связи между наземной приемной станцией и объектом управления;

- публичную сеть (Интернет), связывающую немецкий наземный сегмент с российским.

Особенности исследуемой сетевой среды характеризуются необходимостью использования на российской стороне режима компенсации задержек, неупорядоченной доставки или потерь пакетов при прохождении данных через сеть Интернет, что позволяет реализовать интерактивное управление, учитывающее пространственные и временные ограничения.

Алгоритм двухконтурной системы управления

Учитывая особенности используемой сетевой среды, процессы информационного обмена ЗМ и робота предлагается декомпозировать на два класса: локальную обработку команд управления в режиме жесткого реального времени и процессы доставки команд управления через сетевую инфраструктуру с использованием модели взаимодействия типа «точка-точка» и протоколов из стека TCP/IP. Организованная таким образом система обеспечивает взаимодействие двух контуров управления (рис. 1):

- локального контура, в котором программный модуль «контроллер ЗМ» (КЗМ) обеспечивает циклический опрос текущих координат ЗМ, вычисление и отправку в ЗМ вектора силы, зависящего от текущего положения и скорости перемещения рукоятки, а также информации обратной связи (T'), получаемой от объекта управления (ОУ);
- сетевого контура, в котором программные компоненты используются для организации процесса передачи векторов управления (C) и данных телеметрии (T) между КЗМ и ОУ.

Основой сетевого контура управления является программный модуль Транспорт, состоящий из сетевых модулей задающего манипулятора и ОУ (СМЗМ и СМОУ, соответственно, см. рис 1), связанных виртуальным транспортным каналом, построенным на базе протокола UDP [9]. С конечными системами (КЗМ и ОУ) сетевые модули связаны через модули адаптации (МА) к свойствам среды передачи (МАЗМ и МАОУ, соответственно).

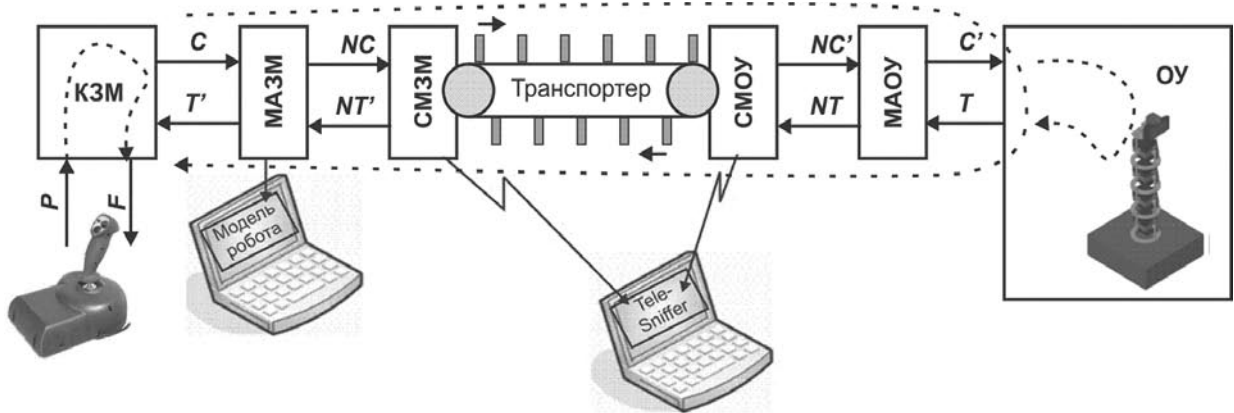


Рис. 1. Структура системы телеуправления

Очевидно, что для обеспечения плавности управления силовым воздействием на рукоятку ЗМ частота циклов КЗМ должна быть достаточно высокой. Связку КЗМ–ЗМ при этом можно рассматривать как «почти аналоговую» систему, что упрощает математическое описание системы и анализ ее устойчивости. Также как аналоговую систему желательно рассматривать и ОУ со своим локальным контуром управления, обеспечивающим его движение под управлением задания, приходящего в виде вектора C' . Обе эти конечные «почти аналоговые» системы объединяются в глобальный контур через сеть с пакетной коммутацией. Темп посылки пакетов по сети может быть значительно ниже частоты циклов КЗМ, поэтому связь по сети следует рассматривать как дискретную (по времени), причем, вносящую существенное запаздывание.

Программный модуль Транспортер основан на протоколе UDP и предназначен для обеспечения изохронной связи локальных контроллеров: отсчеты вектора управления, равномерно получаемые от локального контроллера ЗМ, должны также равномерно передаваться локальному контроллеру ОУ. Аналогично во встречном направлении должны передаваться отсчеты вектора телеметрии. Таким образом, организуется дискретная связь «почти аналоговых» конечных систем с частотой дискретизации, равной частоте отправки сообщений. Однако задержка доставки, вносимая сетью

Интернет, не является постоянной. Задачей принимающей части Транспортера является контроль правильного порядка поступления пакетов. Транспортер также определяет текущее состояние среды передачи: задержку доставки (среднюю и вариации), а также вероятность пропадания сообщения.

Кроме изохронной доставки потоков отсчетов векторов, Транспортер обеспечивает и доставку асинхронных сообщений о событиях, имеющих отношение к процессу телеуправления. Примером таких событий является нажатие кнопок, имеющих на рукоятке ЗМ. Такие события возникают эпизодически в произвольный момент времени, но они должны гарантированно дойти до получателя, сохраняя привязку по времени к передаваемому изохронному потоку отсчетов.

Для учета задержек в канале связи в контур управления добавлены элементы, которые называются *модулями адаптации*. Задачами модулей адаптации является восполнение пропущенных отсчетов, а также трансляция векторов управления и телеметрии (C, T) в сообщения, передаваемые по сети (NC, NT), с учетом текущих параметров среды передачи (и обратные преобразования на противоположной стороне). Модули адаптации предназначены для решения задачи обеспечения управляемого устройства дополнительной информацией, что позволит не допустить перерывов в процессе передачи управляющих сигналов и тем самым обеспечить плавность управле-

ния роботом. В простейшем случае трансляция прозрачна: в сообщениях передаются непосредственно текущие (на момент отправки) значения соответствующих векторов (отсчеты), и на принимающей стороне эти векторы передаются в локальный контур управления. Для визуализации модели робота и контроля процессов управления Транспортёр передает на компьютер оператора потоки отсчетов векторов текущей позиции ЗМ и телеметрии. Для отладочных целей в сетевые модули введена возможность отправки сообщений трассировки на внешний приемник (на рис. 1 обозначен как TeleSniffer).

Структура системы управления

По результатам анализа ряда работ по соответствующей тематике [4–7] построена схема контура управления, позволяющего решить поставленную задачу. Данная схема изображена на рис. 2.

На схеме можно видеть разделение контура на три основные части:

- контур управляющего устройства (на схеме слева), выходом которого является вектор управления C , отображающий текущее положение рукоятки манипулятора p_m . Перемещение рукоятки определяется силой f , складывающейся из силы воздействия оператора f_h , силы f , формируемой

регулятором ЗМ, и силы f_e' , отображающей силу воздействия окружающей среды f_e на робота. Входом p регулятора ЗМ является рассогласование текущей позиции ЗМ (p_m) с отображением текущей позиции робота (p_s). Параметры регулятора – вектор $\{A\}$ – могут изменяться динамически;

- средства коммуникации (Транспортёр), вносящие задержки доставки, и модули адаптации, парирующие действие этих задержек. В общем случае задержки в прямом (T_f) и обратном канале (T_b) могут быть различными;

- контур управляемого устройства (на схеме справа), вырабатывающего воздействие на робота по рассогласованию его текущей позиции p_s и отображения p_m' позиции задающего манипулятора. На робота также может воздействовать окружающая среда с силой f_e . В качестве обратной связи может использоваться вектор текущей позиции робота p_s и, при наличии соответствующих датчиков, вектор силы воздействия окружающей среды f_e .

Модель настройки параметров контура управления

Организация телеприсутствия требует, чтобы в процессе управления оператор имел возможность «ощущать» текущее состояние робота и сети передачи данных.

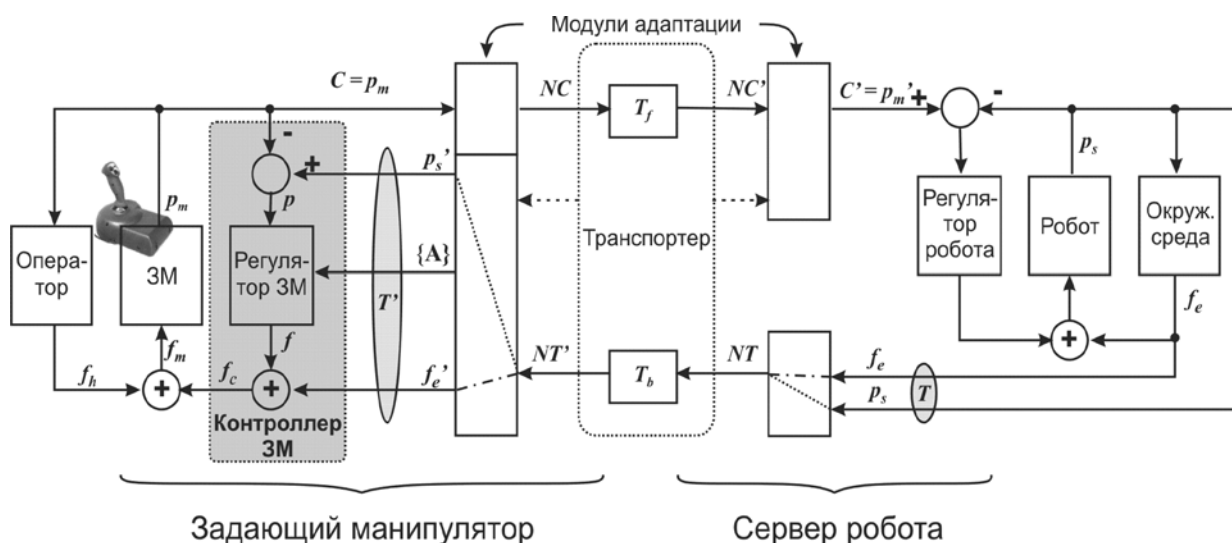


Рис. 2. Организация контура управления, толерантного к задержкам

Поэтому для описания конфигурационного пространства системы управления предлагается использовать модель виртуальной пружины, закрепленной одним концом в основание джойстика, начальное положение которой совпадает с текущим положением управляемого робота. В начальном положении робот никаким образом не воздействует на ЗМ. Однако если оператор начнет осуществлять управление и выводить джойстик из начального положения, то чем дальше будет отведен джойстик от начального положения, тем большие усилия операция растяжения виртуальной пружины потребует от оператора. На рис. 2 представлена схема, реализующая алгоритм расчета величины силомоментного воздействия, которую ощущает оператор в процессе управления. Сила упругости виртуальной пружины рассчитывается по результатам анализа текущего положения джойстика с учетом пришедшей информации о положении робота, которая рассчитывается по формуле:

$$p = p'_s - p_m, \quad (1)$$

где p'_s – вектор координат робота, который на данный момент доступен для обработки в модуле адаптации джойстика; p_m – теку-

щее положение манипулятора. Расчет силового воздействия, ощущаемого оператором, производится по следующей формуле:

$$f(t) = A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p}, \quad (2)$$

где A_0 – астатизм системы; A_1 – жесткость виртуальной пружины; A_2 – вязкость среды, в которой происходит управление; A_3 – виртуальная масса рукоятки.

В процессе управления стартовое положение виртуальной пружины будет изменяться так, чтобы совпасть с текущим положением координат робота. Для «очувствления» состояния среды передачи данных жесткость виртуальной пружины должна не только увеличиваться в зависимости от расхождения положения робота и ЗМ, но и корректироваться с учетом величины задержки данных в канале связи, увеличивая, таким образом, инерционность сетевого контура управления.

Для реализации такого режима взаимодействия на управляющем устройстве потребуется обрабатывать дополнительный объем информации о состоянии канала связи, в качестве которой в ЗМ используются упорядоченная по времени последовательность отсчетов параметра задержки

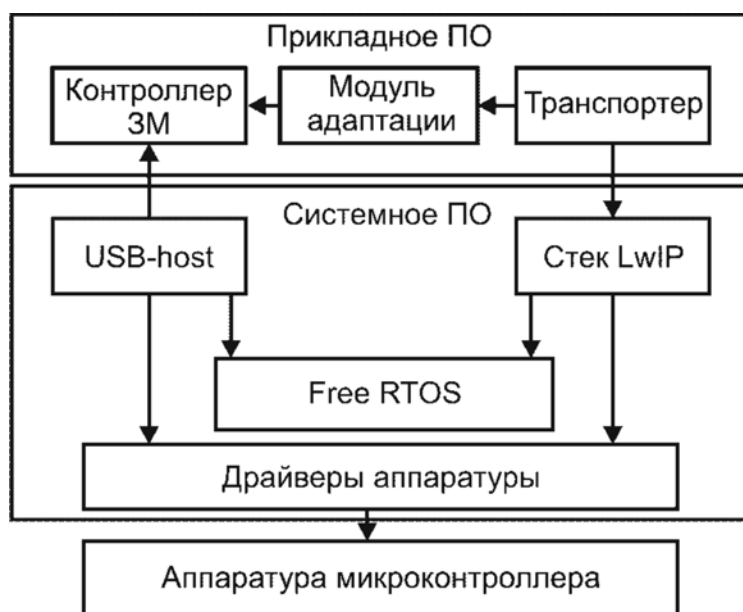


Рис. 3. Структура ПО задающего манипулятора

RTT и доля потерянных сетевых пакетов (ДПП) [3, 4, 10] по формуле (3), который соизмерим с постоянной времени всей замкнутой системы управления:

$$f(t) = (A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p}) + A_4 \cdot \text{RTT} \cdot \text{ДПП} \cdot \frac{p}{\|p\|}, \quad (3)$$

где A_4 – коэффициент влияния среды передачи данных на силовомоментное очувствление.

В результате при увеличении задержек величина силового воздействия на рукоятку ЗМ не позволит оператору осуществлять быстрое изменение его положения. Это обстоятельство хотя и уменьшит скорость перемещения робота, но позволит оператору корректировать результаты отработки операций, анализируя данные об управляющих воздействиях, несмотря на то, что эти данные станут доступны оператору с задержкой.

Согласно требованиям билатерального управления, программное обеспечение двухконтурной системы телеуправления является симметричным. Локальные контроллеры как ЗМ, так и робота реализованы в виде ПИД-регуляторов и отличаются друг от друга лишь параметрами настройки. На рис. 3 приведена структура разработанного программного обеспечения задающего манипулятора джойстика, для реализации которого используется 32-разрядный ARM микроконтроллер.

Программный модуль контроллера ЗМ обеспечивает чтение текущих координат и состояния кнопок джойстика, а также формирование и подачу команд управления силовым воздействием. Модуль реализует функции ПИД-регулятора, для которого входная величина и коэффициенты в законе управления формируются программным модулем адаптации.

Модуль Транспортера осуществляет регулярный прием и передачу данных из сети, обращаясь к модулю адаптации для преобразования векторов управления и телеметрии, а также обработки текущей ин-

формации о задержках в канале передачи данных. Модуль адаптации осуществляет преобразования, обеспечение устойчивости замкнутой системы и показатели качества управления.

Модуль Транспортер активизируется с удвоенной частотой обмена данными, что позволяет вызывать модуль адаптации, попеременно передавая ему на обработку то вектор телеметрии, полученный от робота, то вектор управления, полученный от контроллера джойстика. Результат работы модуля адаптации, соответственно, передается контроллеру джойстика или отправляется по сети объекту управления. Если в нужный момент времени во входной очереди сообщений нет, то в этом случае модуль адаптации формирует управляющее воздействие на основе предсказанного с использованием (3) вектора значения жесткости виртуальной пружины и скорости перемещения исполнительного органа робота.

В статье рассмотрен новый подход к развитию концепции «internet of things» на примере создания системы удаленного управления робототехническими объектами в процессе космического эксперимента «Контур-2». Данный подход подразумевает наличие иерархической структуры, включающей три уровня: макроуровень, осуществляющий логическую связанность объектов; мезоуровень, отвечающий за формирование виртуальных каналов связи; микроуровень обработки сетевых пакетов. Предложены протоколы и алгоритмы мезоскопического уровня, позволяющие использовать сетевые технологии для формирования информационно-транспортной инфраструктуры нового класса, объединяющей различные технические устройства и человека-оператора в систему.

Для обработки новых технических решений и трансфера технологий используются возможности существующей информационно-коммуникационной инфраструктуры управления динамическими объектами на поверхности Земли с борта Международной космической стан-

ции [11]. Особенностью предложенного решения является использование двух-контурной системы, в которой «почти аналоговые» локальные объекты связаны телематическими каналами, вносящими переменные задержки в процесс доставки информации. Предложенная модель силомоментного очувствления позволяет «виртуализировать» инерционность объекта управления путем количественной оценки времени задержки в доставке пакетов данных и идентифицировать состояние транспортной инфраструктуры для

выбора безопасной скорости перемещения динамического объекта. Предложена архитектура программного обеспечения, позволяющая реализовать интерактивное взаимодействие оператора и динамического объекта управления в билатеральном режиме.

Работа выполнена специалистами ЦНИИ РТК и СПбГПУ, кафедры телематики (при ЦНИИ РТК) по программе КЭ «Контур-2» при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13 07 12106 офи_м, Министерства образования и науки РФ и контракта СПбГПУ с компанией FORD Motors, заключенного в рамках University Research Program.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashton Kevin. That 'Internet of Things' Thing, in the real world things matter more than ideas // RFID Journal. 22.06.2009.
2. Gubbia J., Buyyab R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29. – P. 1645–1660.
3. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 1 // Программная инженерия. – 2012. – № 2. – С. 22–28.
4. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 2 // Программная инженерия. – 2012. – № 3. – С. 21–29.
5. Zaborovsky Vladimir, Zayats Oleg, Mulukha Vladimir. Priority Queueing With Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism // Proc. of The IX Internat. Conf. on Networks (ICN 2010), Menuires, The Three Valleys, French Alps, 11-16 April 2010. – Published by IEEE Computer Society, 2010. – P. 316–320.
6. Заборовский В.С. Кондратьев А.С., Силенко А.В., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С.,

- Филиппов М.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 6(162). – С. 23–32.
7. Artigas Jordi, Jee-Hwan Ryu, Preusche C., Hirzinger G. Network representation and passivity of delayed teleoperation systems // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ Internat. Conf. on 25–30 Sept. 2011. – P. 177–183.
8. Niemeyer Gьnter, Jean-Jacques E. Slotine. Telemanipulation with time delays // Internat. J. of Robotics Research. – Sept. 2004. – № 23(9). – P. 873–890.
9. Гук М.Ю., Селезнев К.С., Балицкий В.И., Колесник А.М. Реализация алгоритмов взаимодействия с удаленными робототехническими объектами через ненадежные каналы связи // Св-во о гос. рег. программ для ЭВМ № 2012619599.
10. Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kupreenko Sergey, Mulukha Vladimir. Dynamic Access Control in Cloud Services // Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – 2011. – Vol. 7. – № 3/4. –P. 264–277.
11. Ford Studying Space Robots with the Russians for Next-Gen Vehicle Communications Systems [электронный ресурс] / URL: <http://www.technologytell.com/in-car-tech/5137/ford-studying-space-robots-with-the-russians-for-next-gen-vehicle-communications-systems/>

REFERENCES

1. Ashton Kevin. That 'Internet of Things' Thing, in the real world things matter more than ideas / RFID Journal. 22.06.2009.
2. Gubbia J., Buyyab R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / Future

Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29. – P. 1645–1660.

3. **Zayats O.I., Zaborovskiy V.S., Mulyukha V.A., Verbenko A.S.** Upravlenie paketnymi kommutatsiyami v telematicheskikh ustroystvakh s ogranichennym buferom pri ispolzovanii absolyutnogo prioriteta i veroyatnostnogo vytalkivayushchego mekhanizma. Ch. 1 / Programmnyaya inzheneriya. – 2012. – № 2. – S. 22–28. (rus)

4. **Zayats, O.I., Zaborovskiy V.S., Mulyukha V.A., Verbenko A.S.** Upravlenie paketnymi kommutatsiyami v telematicheskikh ustroystvakh s ogranichennym buferom pri ispolzovanii absolyutnogo prioriteta i veroyatnostnogo vytalkivayushchego mekhanizma. Ch. 2 / Programmnyaya inzheneriya. – 2012. – № 3. – S. 21–29. (rus)

5. **Zaborovsky Vladimir, Zayats Oleg, Mulukha Vladimir.** Priority Queueing With Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism / Proc. of The IX Internat. Conf. on Networks (ICN 2010), Menuires, The Three Valleys, French Alps, 11-16 Apr. 2010. – Published by IEEE Computer Society, 2010. – P. 316–320.

6. **Zaborovsky V.S., Kondratyev A.S., Silinenko A.V., Mulyukha V.A., Iyashenko A.S., Filippov M.S.** Udalennoye upravleniye robototekhnicheskimi ob'yektami v kosmicheskikh eksperimentakh serii «Kontur» / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti

SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. – St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – № 6(162). – S. 23–32. (rus)

7. **Artigas Jordi, Jee-Hwan Ryu, Preusche C., Hirzinger G.** Network representation and passivity of delayed teleoperation systems / Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ Internat. Conf. on 25–30 Sept. 2011. – P. 177–183.

8. **Niemeyer G nter, Jean-Jacques E. Slotine.** Telemanipulation with time delays / Internat. J. of Robotics Research. – Sept. 2004. – № 23(9). – P. 873–890.

9. **Guk M.Yu., Seleznev K.S., Balitskiy V.I., Kolesnik A.M.** Realizatsiya algoritmov vzaimodeystviya s udalennymi robototekhnicheskimi ob'yektami cherez nenadezhnyye kanaly svyazi / Sv-vo o gos. reg. programm dlya EVM № 2012619599. (rus)

10. **Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kuprenko Sergey, Mulukha Vladimir.** Dynamic Access Control in Cloud Services / Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – 2011. – Vol. 7. – № 3/4. – P. 264–277.

11. Ford Studying Space Robots with the Russians for Next-Gen Vehicle Communications Systems. Available <http://www.technologytell.com/in-car-tech/5137/ford-studying-space-robots-with-the-russians-for-next-gen-vehicle-communications-systems/>

ЗАБОРОВСКИЙ Владимир Сергеевич – *заведующий кафедрой телематики (при Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики) Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vlad@neva.ru

ZABOROVSKY, Vladimir S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politeknicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vlad@neva.ru

ГУК Михаил Юрьевич – *начальник отделения Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: mgook@stu.neva.ru

GUK, Michail Yu. *Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tichoretskiy pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: mgook@stu.neva.ru

МУЛЮХА Владимир Александрович – *старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

MULIUKHA, Vladimir A. *Senior Researcher Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tichoretskiy pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

ИЛЪЯШЕНКО Александр Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com

ILYASHENKO, Aleksandr S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com