

На правах рукописи



Елизаров Максим Андреевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В СЕТЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2017

Работа выполнена на кафедре информационных систем и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет» (СПб ГЭУ)

Научный руководитель: Татарникова Татьяна Михайловна,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Парамонов Александр Иванович
доктор технических наук,
Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф. М.А.
Бон-Бруевича, кафедра сетей связи и передачи
данных, профессор, г. Санкт-Петербург

Попов Николай Николаевич
кандидат технических наук,
Российский государственный
гидрометеорологический университет, кафедра
информационных технологий и систем
безопасности, доцент, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ПАО «Интелтех», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «25» декабря 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://www.eltech.ru/>.

Автореферат разослан «24» октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., проф.



Цехановский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. По поручению президента РФ Путина В.В., разработана программа «Цифровая экономика», в работе над которой приняли участие порядка 150 экспертов из разных сфер науки и экономики. Программа ориентирована на рост эффективности всех отраслей благодаря быстрому развитию и внедрению в них информационных технологий. Программа содержит девять направлений: регулирование, информационная инфраструктура, исследования и разработки, система управления, кадры и образование, информационная безопасность, государственное управление, "умный город" и цифровое здравоохранение. Каждое направление планируется реализовать с применением новых концепций построения вычислительных сетей, одной из которых является Интернет вещей.

Интернет вещей (Internet of Things – IoT) – это новая инфокоммуникация, технически реализованная как вычислительная сеть, состоящая из множества физических предметов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для обмена данными между собой и внешней средой. Формально IoT можно определить в виде следующей символической формулы:

$$\text{IoT} = \text{Сенсоры (датчики)} + \text{Данные} + \text{Сети} + \text{Услуги}.$$

IoT-технология находится на стадии ранней реализации и активных исследований, ее развитие выглядит многообещающим в различных областях индустрии – производстве, логистике, медицине, энергетике, транспорте, городском хозяйстве, управлении чрезвычайными ситуациями и области применения продолжают стремительно расти.

На международном уровне концепция IoT уже обретает черты сформировавшейся технологии – ведутся активные работы в области стандартизации архитектуры, технических компонентов, приложений. Одновременно с этим требуются новые модели и алгоритмы, учитывающие специфику информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

Специфика информационного взаимодействия определяется фундаментальными характеристиками IoT-технологии, к числу которых в соответствии с рекомендациями Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) относятся:

Связность – возможность любой вещи быть связанной с глобальной инфокоммуникационной структурой.

Обеспечение вещей услугами – предоставление сетевых услуг без ограничений, в том числе автономно для физических и виртуальных вещей.

Гетерогенность – характеристика Интернета Вещей, определяющая построение IoT-устройств на различных аппаратных, программных платформах и сетях.

Динамические изменения – характеристика, определяющая динамические изменения статуса вещей, например, от спящих к активным, от связанных в определенный момент времени с сетью – к несвязанным и т. д. Число вещей, местоположение, скорость и т. п. также могут меняться динамически.

Огромное число вещей – характеристика, которая базируется на прогнозных оценках, в соответствии с которыми речь идет о десятках триллионов вещей и о триллионных сетях соответственно.

Перечисленные особенности не позволяют применять методы и алгоритмы, на базе которых функционируют инфраструктурные вычислительные сети к Интернету вещей. Этому есть несколько причин: связность и динамические изменения делает топологию сети нерегулярной, использование беспроводных технологий, «туманных» и «облачных» вычислений вызывают появление коллизий источников данных при доступе к ресурсам IoT, а гетерогенность и ряд других требований, например, по энергоэффективности влияют на вероятностно-временные характеристики информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

Таким образом, специфика сетей IoT, как объекта исследования и необходимость в новых моделях и алгоритмах, позволяющих получать оптимальные решения по организации информационного взаимодействия в сетях IoT определили актуальность темы диссертационной работы.

Степень разработанности проблемы. По вопросам стандартизации, моделирования, проектирования и разработки систем и сетей Интернета вещей опубликовано сравнительно небольшое число работ в силу становления этой области исследования. Среди работ отечественных и зарубежных авторов отметим труды Б.С. Гольдштейна, А.Е. Кучерявого, А.В. Рослякова, С.В. Ваняшина, А.Ю. Гребешкова, М.Ю. Самсонова, В.А. Варгаузина, В.В. Вишневого Л. Черняка, М. Гиббса, М. Бхуптани, Л. Круза и других, составляющих теоретическую базу проектирования Интернета вещей, а так же работы Т.И. Алиева, Ю.Г. Карпова, О. И. Кутузова, Ю.И. Рыжикова, Б.Я. Советова, Т.М. Татарниковой, С.А. Яковлева в области моделирования процессов функционирования распределенных систем и их элементов, к числу которых относятся сети Интернета вещей. Это новое направление находится в состоянии постоянного развития.

Цель диссертационной работы состоит в разработке моделей и алгоритмов информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей с учетом фундаментальных характеристик IoT-технологии.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены, обоснованы и решены следующие задачи:

1. Предложена модель информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.
2. Разработан комплекс математических моделей по оценке вероятностно-временных характеристик информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.
3. Предложены вероятностные алгоритмы структурной организации «туманных вычислений» и классификации данных в «облачных вычислениях» сети Интернета вещей.
4. Получены зависимости вероятностно-временных характеристик от параметров сети Интернета вещей.

Объектом исследования является сеть Интернета вещей, построенная на основе гетерогенных сетевых технологий.

Предметом исследования является применение моделей и алгоритмов информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

Методы исследования. Решение сформулированной в диссертационной работе проблемы разработки моделей и алгоритмов информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей базируется на методах системного анализа, теории вероятности, случайных процессов и математической статистики, методов численного анализа, имитационного моделирования.

К основным **научным результатам диссертации**, которые определяют новизну исследования и выносятся на защиту, относятся:

1. Модель информационного взаимодействия построена с учетом фундаментальных характеристик технологии Интернета вещей, что позволяет адекватно оценивать вероятностно-временные характеристики информационного взаимодействия.

2. Комплекс математических моделей сочетает аналитический и статистический методы моделирования, что позволяет оценить вероятностно-временные характеристики передачи данных на всех этапах информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.

3. Вероятностные алгоритмы структурной организации «туманных вычислений» и классификации данных в «облачных вычислениях» построены с применением теории эволюции и нейронных сетей, что позволяет учесть особенности информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

4. Зависимости вероятностно-временных характеристик инвариантны параметрам сети Интернета вещей, что позволяет осуществлять рациональный выбор параметров на ранних этапах проектирования Интернета вещей.

Теоретическая значимость исследования состоит в дальнейшем развитии методов, моделей и технологий построения сетей Интернета вещей в разных отраслях экономики.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в полученных расчетных выражениях, алгоритмах и моделях, необходимых на ранних стадиях проектирования сетей Интернета вещей.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами моделирования и экспериментальных исследований.

Для имитационного моделирования использовалось специализированное программное обеспечение, подкрепленное апробированными теоретическими методами исследований моделей компьютерных систем.

Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты не противоречат ранее полученным данным, описанным в литературе другими авторами.

Апробация работы. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития современного общества: экономические, правовые и социальные аспекты», Волгоград, 29-30 сентября 2014 г.; на X межвузовской научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и докторантов «Проблемы и пути развития предпринимательской деятельности в современных условиях» СПбГЭУ 13-14 марта 2014 г.; X Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2017)», 1-3 ноября 2017 г.; кафедральных семинарах (СПбГЭУ 2014-2017 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 10 печатных работах, в том числе в четырех работах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Автором выполнены основные расчеты, разработана имитационная модель информационного взаимодействия, проведены экспериментальные исследования на моделях различных этапов информационного взаимодействия. Автором разработан макет системы Интернета вещей для получения обучающей выборки нейронной сети, решающей задачу классификации данных в «облачных вычислениях».

Результаты, выносимые на защиту.

1. Модель информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.
2. Комплекс математических моделей по оценке вероятностно-временных характеристик информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.
3. Вероятностные алгоритмы структурной организации «туманных вычислений» и классификации данных в «облачных вычислениях» сети Интернета вещей.
4. Зависимости вероятностно-временных характеристик от параметров сети Интернета вещей.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (всего 81 источник). Общий объем работы – 128 страниц сквозной нумерации, в том числе основного текста – 120 машинописных страниц, 51 рисунок, 4 таблицы.

КАРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Исследование организации сетей Интернета вещей» проводится анализ технологий и архитектуры построения сетей Интернета вещей, рассматриваются основные IoT-устройства и узлы, способы их взаимодействия. Выполняется постановка задачи диссертационного исследования.

Показано, что в идее Интернета вещей присутствуют две самостоятельные технологии: территориально-распределённые сенсорные сети и M2M (Machine to Machine). Первая основана на совместной работе большого числа миниатюрных узлов – сенсорных устройств (СУ), вторая обеспечивает взаимодействие СУ друг с другом и предоставление пользователю результатов их совместной деятельности. Взаимодействия СУ друг с другом в рамках одной сенсорной сети образуют топологию mesh – ячеистую топологию. Самоорганизующаяся сеть с топологией mesh позволяет реализовать следующие возможности:

- создание зон сплошного информационного покрытия большой площади;
- масштабируемость сети, то есть увеличение площади зоны покрытия и плотности информационных потоков в режиме самоорганизации;
- использование беспроводных транспортных каналов для связи в режиме «каждый с каждым»;
- устойчивость сети к потере отдельных элементов.

Задачи, решаемые Интернетом вещей, требуют использования вычислительных ресурсов облака, которое функционально может быть двух видов: «облачные вычисления» (Cloud Computing) и «туманные вычисления» (Fog Computing), где первые обеспечивают доступ по требованию к некоторым общим вычислительным ресурсам, например, сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам, вторые, являясь разновидностью облачных сервисов реализуются локальными сенсорными сетями и расположены вокруг «облака». Такая организация сетей Интернета вещей предполагает децентрализацию обработки данных за счет передачи части работы по обработке данных с «облака» вычислительным ресурсам «тумана» (рис. 1).

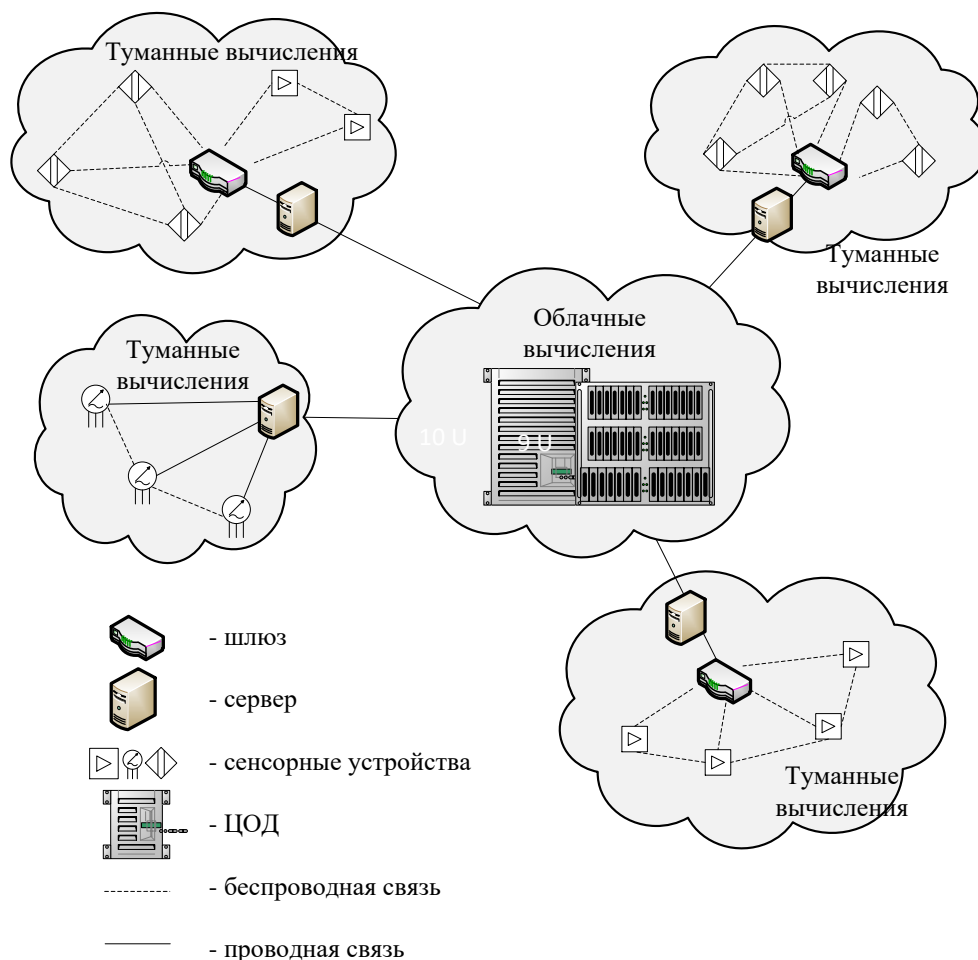


Рис. 1. Туманные и облачные вычисления в концепции Интернета вещей

Анализ инфокоммуникационных технологий, обеспечивающих функционирование сетей Интернета вещей показал их гетерогенный характер. Связь технологий друг с другом отражена в архитектуре IoT, включающей четыре функциональных уровня:

Уровень взаимодействия со средой – самый нижний уровень архитектуры IoT, включающий сенсорные устройства и сенсорные сети. СУ реализуют соединение физического и виртуального (цифрового) миров, обеспечивая сбор и обработку информации в реальном масштабе времени. Большинство СУ требуют агрегации посредством шлюзов.

Сетевой уровень обеспечивает транспорт большим объемам данных, создаваемых многочисленными СУ на первом уровне IoT и состоит из конвергентной сетевой инфраструктуры, которая создается путем интеграции разнородных сетей в единую сетевую платформу.

Сервисный уровень содержит набор информационных услуг, которые автоматизируют технологические бизнес-операции в IoT: поддержки операционной и бизнес деятельности, различной аналитической обработки информации, хранения данных, обеспечения информационной безопасности, управления бизнес-процессами и других.

Уровень приложений включает различные типы приложений для соответствующих промышленных секторов и сфер деятельности, таких как энергетика, транспорт, торговля, медицина, образование и другие. Приложения могут быть «вертикальными», когда они являются «специфическими» для конкретной отрасли промышленности, а также «горизонтальными», которые могут использоваться в различных секторах экономики.

Одним из вопросов организации Интернета вещей является разработка методов взаимодействия между СУ (интернет-вещами). На практике реализуют три способа взаимодействия: прямой доступ, доступ посредством шлюза, доступ посредством сервера. В работе обсуждаются достоинства и недостатки каждого способа и соответствующие им группы протоколов.

Анализ IoT-технологии позволил выявить специфику информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей и сделать вывод о невозможности применения моделей и алгоритмов традиционных компьютерных сетей к сетям Интернета вещей.

Эти обстоятельства позволили сформулировать задачу диссертационного исследования, как задачу разработки моделей и алгоритмов, способствующих выбору оптимальных режимов информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

При решении поставленной задачи предлагается средствами моделирования оценивать функциональную зависимость между набором параметров P , задающих сеть Интернета вещей количественно и вероятностно-временными характеристиками H , описывающих информационное взаимодействие качественно, т.е. формально

$$H=f(P).$$

Такая постановка позволяет при разных условиях решать все три вида задач моделирования, необходимых при проектировании сетей Интернета вещей:

прямую – оценивать характеристики при имеющихся параметрах сети Интернета вещей,

обратную – при заданных допустимых значениях характеристик проектировать сеть Интернета вещей из элементов с соответствующими параметрами

настройки – строить модели, основанные на предложенных методах и алгоритмах, позволяющие выявить функциональную зависимость между множествами P и H .

Ко множеству параметров P отнесены потоковые и структурные метрики:

- каждое сенсорное устройство характеризуется интенсивностью идентификации себя в пространстве Интернета вещей, периодами активности и пассивности;
- каждый узел Интернета вещей задается параметрами производительности;
- структура связей соответствует топологии mesh (рис. 2);
- элементы связей СУ-узел и узел-узел задаются временем передачи вызова в прямом и обратном направлениях; значениями вероятностей потери связи;

Сеть построена как интеграция «туманных» (кластерных) и «облачных» вычислений, количество которых теоретически не ограничено. В одном кластере размещается несколько маршрутизаторов и шлюзов, которые подключаются к магистральному информационному каналу с помощью оптического либо электрического кабеля или по радиоканалу с использованием систем широкополосного доступа.

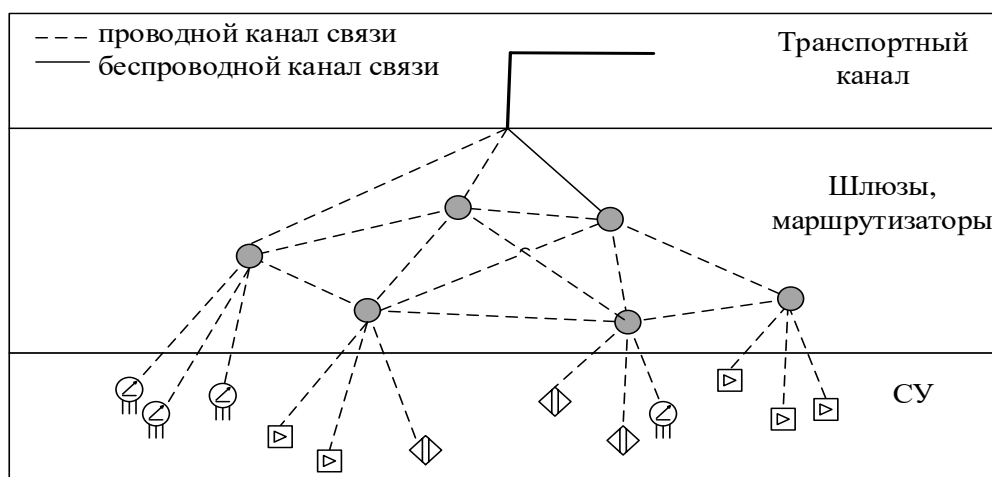


Рис. 2. Общий вид структурной организации mesh-сети

Шлюзы в кластере соединяются между собой по радиоканалу. Протоколы, реализующие функции транспортировки в mesh-сети основаны на создании таблицы маршрутизации с контролем состояния транспортного канала и поддержкой динамической маршрутизации, что позволяет каждому из них отправлять трафик по оптимальному маршруту между соседними узлами. При отказе какого-либо из узлов происходит автоматическое перенаправление трафика по другому маршруту, что гарантирует не только его доставку, но и доставку за минимальное время. В условиях резких скачков трафика как внутри сети, так и на ее границах проблема может решаться установкой новых шлюзов в пределах кластера, интеграция которых происходит автоматически. Увеличение зон покрытия сводится к добавлению в сеть новых СУ и шлюзов, что происходит так же автоматически, тем самым выполняется масштабирование сети Интернета вещей.

Предложено средствами моделирования оценивать вероятностно-временные характеристики сети Интернета вещей. Модели должны основываться на оригинальных методах и алгоритмах, учитывающих специфику информационного

взаимодействия в Интернете вещей.

Во второй главе «Модели оценки вероятностно-временных характеристик информационного взаимодействия в сети Интернета вещей» предложены следующие модели:

1) Имитационная модель информационного взаимодействия в Интернете вещей, основанная на мультиагентном подходе (рис. 3).

Модель создана в системе имитационного моделирования AnyLogic и функционирует следующим образом: запросы поступают от агентов сети стохастически. Если агент проходит валидацию и сертифицирован на прием/передачу информации и передает запрос впервые с момента обнаружения в сети, то он добавляется в «карту» сети Интернета вещей для идентификации его в пространстве. После обработки и сохранения информации в памяти происходит отправка управляющей команды от сервера агенту, на которую агент должен отправить нотификацию о получении.

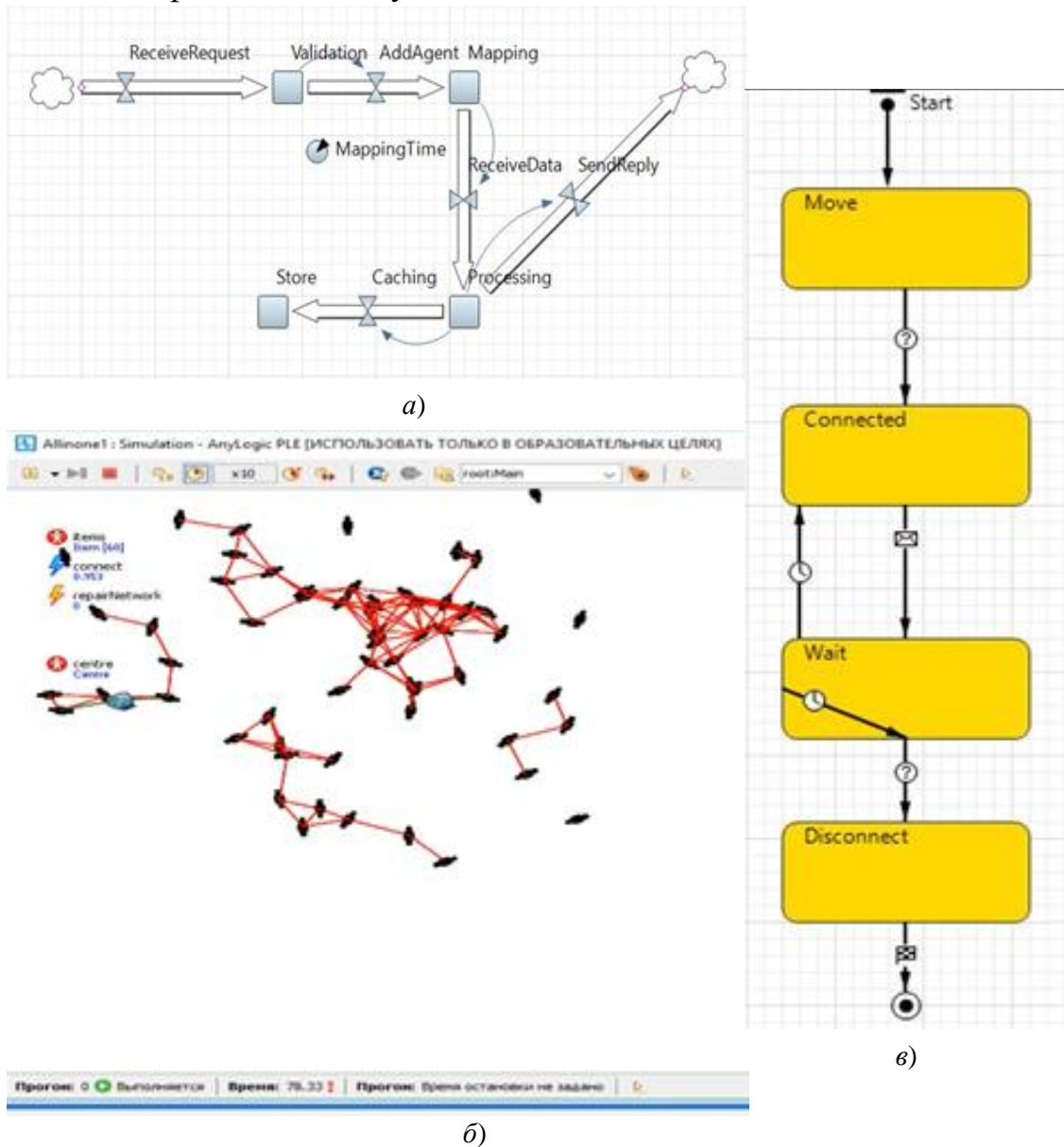


Рис. 3. Имитационная модель информационного взаимодействия
а) структура модели б) окно стейтчат агента в) окно анимации модели

В процессе прохождения всех этапов информационного взаимодействия могут возникнуть следующие ситуации:

– Запрос агента на передачу данных отклонен в силу возникновения коллизий источников данных или маршрут для передачи еще не построен.

– Многократное добавление одного и того же агента в карту. Проблема решается путем удаления объекта из карты, если по истечении заданного времени от него не поступает ответ.

– «Зацикливание» – отправка одной и той же команды агенту после отключения/подключения. Если агент не может выполнить переданную команду (выражается в отсутствии данных, которые ожидается получить в ответ), то система будет предлагать выполнить эту команду снова до тех пор, пока она не будет выполнена, либо по истечении определенного количества попыток, информация о которых хранится в памяти.

– Запрос успешно проходит – информационное взаимодействие состоялось.

Модель создана в системе имитационного моделирования AnyLogic 8.1.0, (рис. 3).

2) Модели доступа в «туманных вычислениях» с разрешением коллизий источников данных во временной области, реализующие соответственно режимы опроса, прерываний, множественного доступа (рис. 4).

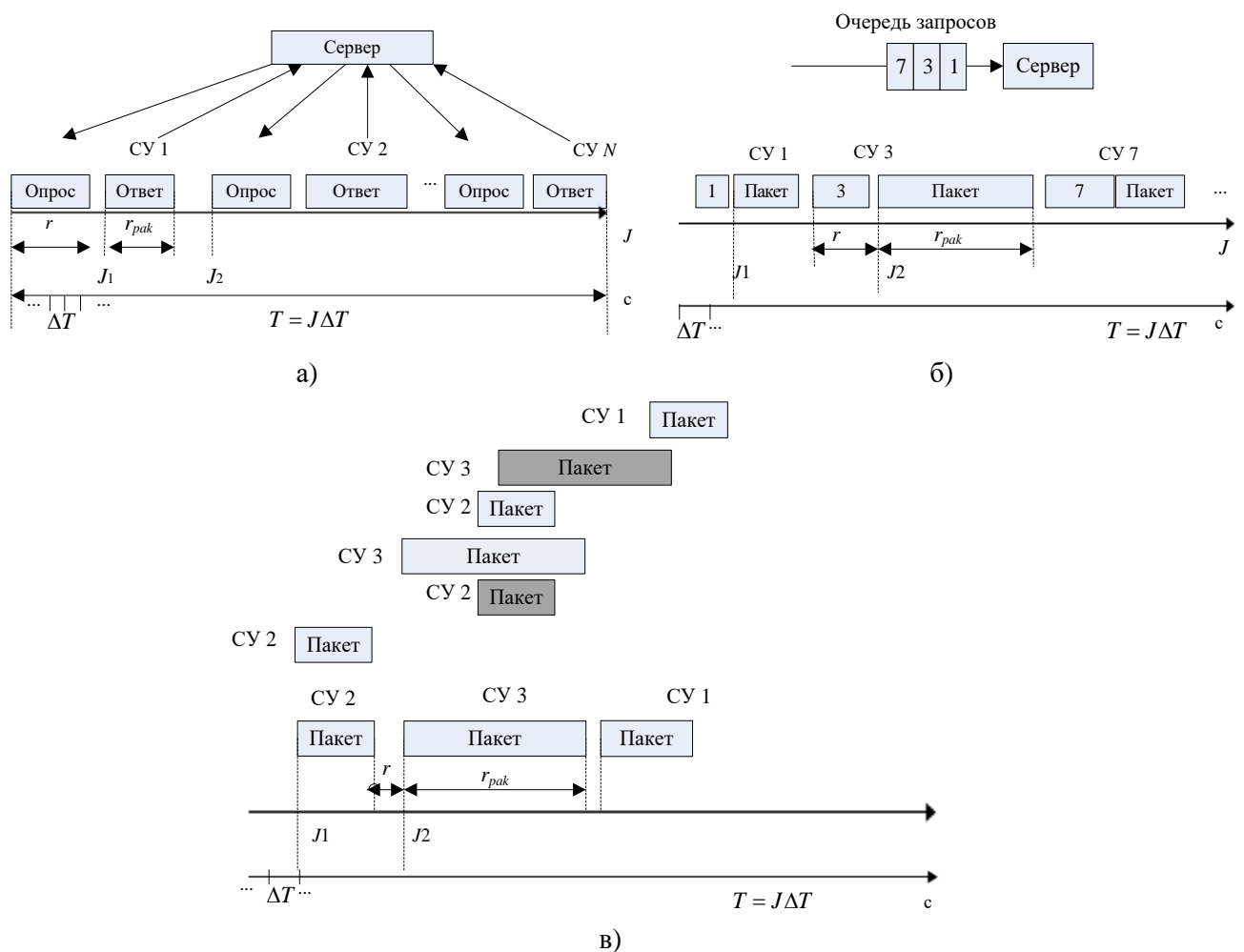


Рис. 4. Временные диаграммы методов доступа:

а) режим опроса б) режим прерываний в) множественный доступ

Каждому СУ назначается идентификатор ID в соответствии с его IP-адресом в составе IoT. Далее для всех СУ генератором случайных положительных целых чисел RND разыгрывается значение времени t начала передачи из диапазона $[L, R]$

$$t=r\Delta T, \quad (1)$$

где r – случайное число, $r \in \text{RND}$;

ΔT – интервал дискретизации системного времени модели.

Центральный узел «тумана» устанавливает соединение с тем СУ, для которого $\min_t [t_{i=1,n}]$, пусть ID этого СУ равен k . Для остальных СУ новое время начала передачи определяется по формуле:

$$J_i \Delta T = J_{i-1} \Delta T + r_{pak} \Delta T + r \Delta T, \quad (2)$$

где J_i – точка отсчета начала следующей передачи данных;

J_{i-1} – точка начала передачи данных предыдущего $(k-1)$ -го СУ;

r_{pak} – число точек отсчета времени, необходимого для передачи данных – постоянная величина, зависит от длины пакета данных;

r – число, задающее число точек отсчета:

- для определения времени затрачиваемого на занятие слота k -м СУ при реализации режима опроса;
- для определения времени доступа при реализации режима прерываний;
- для определения случайной задержки относительно окончания передачи данных $(k-1)$ -м СУ при реализации режима множественного доступа.

Выражение (2) является основной реализацией имитационной модели доступа в «туманных вычислениях».

Предложенные имитационные модели инвариантны количеству сенсорных устройств, формату пакета данных, среднему времени передачи.

3) Вероятностная модель установления информационного взаимодействия в сети Интернет вещей с топологией mesh.

Согласно модели информационного взаимодействия, оценка времени информационного взаимодействия в сети Интернета вещей представлена как сумма:

$$t_{и.в} = t_{у.с} + t_{п.д}, \quad (3)$$

где $t_{и.в}$ – время информационного взаимодействия;

$t_{у.с}$ – время, необходимое на установление соединения для информационного взаимодействия;

$t_{п.д}$ – время передачи данных по установленному соединению информационного взаимодействия.

Для оценки $t_{у.с}$ предлагается вероятностная модель установления соединения в сети Интернета вещей. Оценку $t_{п.д}$ предлагается выполнить с применением аппарата систем массового обслуживания.

Вероятностная модель установления соединения в сети Интернет вещей с топологией mesh позволяет оценить абсолютные и вероятностные характеристики информационного взаимодействия. В модели учтены условия, соответствующие

реальному процессу информационного взаимодействия – динамический статус каналов и точек доступа, ограниченное количество повторных попыток установления соединений, наличие альтернативных маршрутов.

Для оценки времени передачи данных предложено применить аппарат преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС).

В Интернете вещей одновременно передаются между различными ее элементами K независимых потоков данных различных классов интенсивности λ_k , $k=1, \dots, K$. Продолжительность передачи данных каждого класса – независимые случайные величины с любым видом распределения $B_k(t)$, характеризующимся:

$\mu_k=C/l_k$ – пропускной способностью узловой точки, в пакетах/с,

C – пропускной способностью узловой точки, в битах/с,

l_k – длиной пакета данных k -го класса, в битах, $k=1, \dots, K$.

В соответствии со свойствами ПЛС продолжительность передачи данных k -го класса от источника адресату определяется как

$$\beta_k(t) = \prod_{d=1}^N \beta_d(t), \quad (3)$$

где $\beta_d(t)$ – ПЛС длительности пребывания пакета данных в d -м элементе маршрута.

Распределение (3) есть функция от векторов интенсивностей поступления и обслуживания пакетов данных на элементы маршрута $\beta_k(t) = f(\lambda_k, \mu_k)$. Первый центральный момент ПЛС позволяет определить среднее время передачи данных по установленному информационному взаимодействию. Вероятностный смысл ПЛС позволяет выполнить оценку вероятности доставки данных.

В третьей главе «Вероятностные алгоритмы самоорганизации сети Интернета вещей» предложены

– алгоритм формирования альтернативных маршрутов, основанный на эволюционной теории. Алгоритм учитывает накопленную статистику о доставке данных между узлами. Если вероятность ниже заданного порога, то канал не участвует в построении альтернативного маршрута.

– алгоритм самоорганизованного размещения сенсорных устройств, основанный на эволюционной теории.

– нейронная сеть для классификации разнородных и многочисленных данных, поступающих от СУ на обработку в «тумане». Показано, что для разработки нейронной сети необходимо выбрать с помощью эксперимента архитектуру нейронной сети и выполнить обучение сети на тестовых наборах данных.

Работа генетического алгоритма построения множества альтернативных маршрутов L_{ij} , соединяющих источник i и адресат j построена на операциях со следующими типами объектов: маршрут, поколение и сеть. Маршрут представляет собой упорядоченный список номеров узлов сети. Первым в списке идет номер узла, от которого требуется найти маршрут последним – номер конечного узла. Поколение представляет собой массив из маршрутов, к каждому

из которых будут применяться операции рекомбинации – скрещивание и мутация. Размер поколения варьируется. Сеть представлена графом, заданного двумя матрицами – первая хранит задержку передачи данных между узлами, вторая – вероятности потерь пакетов данных между узлами. Матрица вероятности инициализируется случайными значениями в диапазоне $[0 \div 1]$, что отражает динамичные свойства сети Интернета вещей. В процессе работы алгоритма значения вероятностей потерь изменяются случайным образом. Для инициализации начального поколения определяются все существующие маршруты от источника к адресату, вероятности потерь в которых меньше пороговой величины P_n . Далее к маршрутам применяется операция селекции для приведения размера популяции к заданному значению размера поколения. Селекция выполняется методом рулетки. С каждого поколения сортировкой выбираются маршруты с наименьшим прогнозируемым временем доставки данных. Эти маршруты и есть здоровые хромосомы, которые будут участвовать в скрещивании без отбора. Оператор скрещивания позволяет сгенерировать новые маршруты на основе имеющихся, вероятность скрещивания p_{cr} задается интервалом $p_{cr} \in [0.5, 1]$. Оператор мутации представляет собой операцию случайного удаления узловой точки маршрута, вероятность мутации p_{mt} выбрана равной 0,05. Роль фитнес функции выполняет время, которое требуется для доставки данных от источника адресату. На вход генетического алгоритма подается граф, заданный матрицей инцидентности, в которой хранятся значения времени задержки между двумя узлами сети, в мс. На выходе алгоритма записываются найденные альтернативные маршруты в виде упорядоченного списка номеров узловых точек.

Работа генетического алгоритма эффективного размещения СУ в пространстве, с целью максимального покрытия территории наименьшим количеством СУ построена на операциях со следующими типами объектов: плоскость размещения, матрица и множество. Предполагается, что плоскость размещения делится на отдельные фрагменты, характеризующиеся одним из трех состояний: свободное место, препятствие и установленное СУ с неким радиусом действия R . Плоскость представлена как матрица A , в которой пустое место на плоскости обозначается нулем, препятствие обозначается единицей, а различные СУ цифрами $2 \dots N+1$, где N – количество СУ. Матрица разбита на два множества: множество B из идущих подряд ячеек, в которых нет препятствий, и вспомогательное множество C , позволяющее восстановить из B оригинальную матрицу. Разделение происходит следующим образом: производится обход матрицы A , при котором для каждой ячейки, не являющейся препятствием, во множество C записываются подряд два значения индексации ячейки по осям матрицы, а во множество B записывается числовое значение ячейки (ноль или номер СУ). Таким образом, множество B будет представлять собой все позиции, где возможно разместить СУ. Обозначим размер множества B как N_B , тогда для кодирования индекса СУ в этом множестве необходимо использовать $N = \lceil \log_2 N_B \rceil$ бит. Этот закодированный в виде двоичной строки индекс представляет собой один ген хромосомы. Хромосома представляет собой набор из идущих подряд

индексов в битовом коде, описывающих расположение набора СУ во множестве B . Из-за принципов работы ГА (размер всех хромосом должен быть одинаковым), за один проход алгоритма может рассматриваться только константное количество СУ. Фитнесс функция алгоритма высчитывается как суммарная площадь покрытия датчиками.

Классификацию разнородных и многочисленных данных, поступающих от СУ на обработку в «облаке» предложено решать с помощью технологии нейронных сетей. Применение технологии нейронных сетей предполагает, во-первых выбор архитектуры нейронной сети, и во-вторых обучение нейронной сети решению задачи классификацию с заданным уровнем допустимой ошибки.

Выбор архитектуры нейронной сети заключается в подборе гиперпараметров, которыми являются такие величины, как количество нейронов во входном и выходном слоях, количество скрытых слоев, количество нейронов в каждом из скрытых слоев, скорость обучения сети, момент обучения сети, количество эпох, в течение которых сеть будет проходить обучение. Каждый из этих параметров влияет на определенные характеристики, как обучения, так и работы сети.

Обучение нейронной сети предложено выполнить «с учителем» методом обратного распространения ошибки, использующий градиентный спуск.

В четвертой главе «Экспериментальная часть» приведены результаты экспериментов на моделях и алгоритмах, предложенных в работе.

Описываются следующие эксперименты:

1) оценка времени получения доступа к центральному узлу для разных режимов в соответствии с предложенной имитационной моделью доступа в туманных вычислениях. Результаты эксперимента получены в виде:

- $F(J)$, где F – функция распределения отсчетов времени J начала ответа СУ на опрос центрального узла;

- сравнительной оценки средних и с вероятностью $p(0 \leq J \leq J_d) = 0,999$ времени получения доступа СУ для заданного их числа и различных значений $r \in \text{RND}[L, R]$ и минимальных значений J_d ;

- зависимости максимального числа N сенсорных устройств от нагрузки ρ на центральный узел в «тумане»;

- зависимости среднего времени передачи данных \bar{t}_s от нагрузки ρ на центральный узел в «тумане»;

- зависимости среднего времени передачи данных \bar{t}_s от нагрузки ρ на центральный узел в «тумане».

Получена сравнительная оценка средних и с вероятностью $p(0 \leq J \leq J_d) = 0,999$ времени получения доступа сенсорных устройств для заданного их числа и различных значений $r \in \text{RND}[L, R]$ и минимальных значений J_d .

Анализ результатов говорит в пользу режима множественного доступа при нагрузках, уже начиная с $\rho > 0,1$. При этом необходимо учитывать, что высокая нагрузка предполагает, что сенсорные устройства все время будут находиться в активном состоянии для получения доступа к серверу, поскольку в режиме множественного доступа возрастает вероятность возникновения коллизий.

2) анализ зависимостей абсолютных и вероятностных характеристик установления соединения, таких как количество установленных соединений, вероятность установления информационного взаимодействия и времени установления соединения от количества потерянных каналов; количества потерянных узловых точек; количества попыток установления соединения.

Эксперимент, проведенный на сети с топологией mesh, позволил построить важные зависимости, среди которых следующие:

- зависимость количества установленных соединений от допустимого времени на доставку вызова, позволяющая найти необходимые параметры обеспечения гарантированного времени установления соединения;

- зависимости вероятности установления соединения от числа потерянных элементов сети, позволяющие из множества альтернативных маршрутов выбрать тот, который гарантирует установление соединения за допустимое время;

- зависимости вероятности установления соединения и времени установления соединения для разных приоритетов отправки;

- зависимость времени установления соединения от количества попыток, позволяющей определить количество необходимых попыток при известном количестве потерянных элементов сети;

В модели также предусмотрена возможность менять допустимое время установления соединения, и по результатам эксперимента рекомендовать его значение при соблюдении требуемой вероятности установления информационного взаимодействия.

3) Оценка работы генетического алгоритма размещения СУ для плоскости. ГА реализован на языке C++ с использованием классов:

- Grid, описывающего территорию,
- ГА, осуществляющего работу алгоритма,
- `uniform_int_distribution` и `uniform_real_distribution`, генерирующие равновероятную случайную величину.

Класс Grid поддерживает различные размеры плоскости и позволяет установить препятствия, а также некий начальный вариант расстановки СУ.

На вход ГА подаются следующие параметры: существующий Grid; набор СУ, включающий номера СУ и их количество; таблица соответствий СУ и их радиусов действия в виде `map<int,int>`; размер популяции; вероятность скрещивания; вероятность мутации хромосомы; максимальное число итераций до остановки алгоритма.

Для визуализации результата реализован графический интерфейс в виде плоскости размещения различных СУ, на которой отмечаются радиусы действия R всех СУ, что позволяет зрительно оценить качество решения.

4) Классификация данных, поступающих от СУ.

Для решения задачи классификации был разработан макет системы Интернета вещей, данные с которого явились тренировочным сетом для обучения нейронной сети. Макет состоит из цепочки узлов: СУ, шлюз и центральное устройство (сервер). Сенсорное устройство представляет собой прибор передачи, к которому подключен набор датчиков. СУ реализовано на платформе Genuino

101 с программным обеспечением Arduino IDE. Шлюз представляет собой и агрегирующее устройство, и узел, обеспечивающий связь между узлами системы. Взаимодействие между СУ и шлюзом осуществляется по технологии Bluetooth, между шлюзом и сервером – по технологии Wi-Fi. Соответственно шлюз поддерживает обе технологии. Реализация шлюза выполнена на платформе Intel Edison. Сервер обрабатывает данные со всех узлов системы и представляет собой программное обеспечение на компьютере. Сервер получает данные по беспроводной сети, и предоставляет доступ к веб интерфейсу – имитации «облачных вычислений». Сервер реализован на программной платформе Node.js.

Выбор конфигурации нейронной сети представлен большим количеством экспериментов на различных гиперпараметрах. По результатам экспериментов выбрана нейронная сеть с архитектурой, которая показала наименьшую среднеквадратичную ошибку из других возможных, она состоит из 9 нейронов во входном слое, одного скрытого слоя, включающего в себя 12 нейронов, 4 нейрона в выходном слое. В качестве функции активации выбрана сигмоидальная функция.

Тестирование нейронной сети происходит на тренировочных сетях, представляющих собой специально подготовленные последовательности, отображающие значение на входе нейронной сети при незначительном уменьшении концентрации вещества. Значение среднеквадратичной ошибки не превысило одного процента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертационного исследования получено решение важной научно-технической задачи разработки моделей и алгоритмов информационного взаимодействия в сетях Интернета вещей.

Основные новые результаты работы:

1. Имитационная модель информационного взаимодействия, основанная на мультиагентном подходе, которая построена с учетом фундаментальных характеристик технологии Интернета вещей.

2. Комплекс математических моделей включающий:

– модели доступа в «туманных вычислениях» с разрешением коллизий источников данных, реализующие соответственно режимы: опроса, прерываний и множественного доступа;

– вероятностную модель установления информационного взаимодействия в сети Интернете вещей с топологией mesh, позволяющей оценить абсолютные и вероятностные характеристики информационного взаимодействия;

– модель оценки времени передачи данных с применением аппарата ПЛС, первый центральный момент которого позволяет определить среднее время передачи данных по установленному информационному взаимодействию, а вероятностный смысл выполнить оценку вероятности доставки данных.

3. Вероятностные алгоритмы структурной организации Интернета вещей реализующие:

– формирование альтернативных маршрутов;

– самоорганизованное размещение СУ в «тумане»;

– классификацию разнородных и многочисленных данных, поступающих от СУ на обработку в «облаке».

Первые два алгоритма основаны на эволюционной теории, третий на технологии нейронных сетей.

4. Зависимости вероятностно-временных характеристик, которые могут быть полезны при выборе параметров Интернета вещей на ранних этапах проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Елизаров М.А. Архитектура сетей сетевидного управления// Вестник Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2014, №8. С. 91-94.

2. Елизаров М.А. Имитационная модель виртуального канала/Т.М. Татарникова, М.А. Елизаров//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016, Т.16. №6. С. 1120-1127.

3. Елизаров М.А. Процедура разрешения коллизий в RFID-системе / Т.М. Татарникова, М.А. Елизаров //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 2. С. 150-157.

4. Елизаров М.А. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети интернета вещей/ Т.М. Татарникова, М.А. Елизаров// Информационно-управляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 44-50.

В других изданиях:

5. Елизаров М.А. Применение сетевидного принципа управления в области экономики и промышленности// XIII Пушкиревские чтения. Россия сквозь века: История, экономика, право, образование, культура. – 2013. С.18-20

6. Елизаров М.А. Применение алгоритма А* для моделирования поиска маршрута сети// Имитационное моделирование социотехнических систем. – 2013. С. 18-20.

7. Елизаров М.А. Применение и проблемы развития современных вычислительных систем// Экономика и управление в современном обществе. – 2013. С.33-37

8. Елизаров М.А. Проблемы импортозамещения микропроцессорной электроники// Проблемы развития современного общества: экономические, правовые и социальные аспекты. – 2014. С.33-37

9. Елизаров М.А. Перспективы и проблемы развития рынка интернета вещей// Nauka-Rastudent. – 2015. № 12

10. Елизаров М.А. Алгоритмы и технологии решения типовых проблем в интернете вещей// Nauka-Rastudent. – 2016. № 6.