

*На правах рукописи*

**ПРОКОПЬЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАГРУЗКИ  
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на кафедре сетей связи

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Кучерявый Андрей Евгеньевич**

**Официальные оппоненты:** **Сиверс Мстислав Аркадьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций им. проф.  
М.А. Бонч-Бруевича, зав. кафедрой  
радиопередающих устройств и средств  
подвижной связи

**Юркин Юрий Викторович**  
кандидат технических наук, доцент,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения,  
доцент кафедры электрическая связь

**Ведущая организация** **Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения**

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 219.004.02 при Санкт-Петербургском Государственном Университете Телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 61, ауд. 205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзыв об автореферате в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного Совета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

**Харитонов В.Х.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Беспроводные сенсорные сети все активнее проникают в окружающую среду. По прогнозам ведущих экспертов в области телекоммуникаций до 7 триллионов беспроводных устройств будет использоваться в мире к 2017-2020 годам. Сенсорные сети как часть Интернета вещей (Internet of Things) займут важнейшее место в сетях связи уже в среднесрочной перспективе.

Перестав быть объектом исключительно академических исследований, сенсорные сети сейчас поставляются множеством производителей, что привело к появлению разнообразных индустриальных стандартов, не обеспечивающих взаимодействия между оборудованием различных производителей. Основные работы в области стандартизации протоколов, используемых в сенсорных сетях, проводятся Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE), Международным союзом электросвязи (ITU), Инженерным советом Интернета (IETF) и Международной организацией по стандартизации (ISO).

Результатом этих работ стало семейство стандартов IEEE 802.15.4, регламентирующих физический и канальный уровни для организации беспроводных сенсорных сетей, но оставляющих неопределенными сетевой и прикладной уровни. Последующее развитие IP сетей привело к формированию рабочей группы IETF 6LoWPAN для решения проблемы передачи IPv6 пакетов поверх каналов IEEE 802.15.4 способом, удовлетворяющим открытым стандартам и предоставляющим взаимодействие с другими IP каналами и устройствами в той же мере, как и с устройствами IEEE 802.15.4.

Стандартизация протоколов взаимодействия в сенсорных сетях требует проведения классификации приложений по типу создаваемой нагрузки. Параметры качества обслуживания для пакетных сетей связи рассмотрены в рекомендациях МСЭ-Т Y.1540 и Y.1541. В рекомендации Y.1540 определяются параметры, которые могут быть использованы для оценки эффективности скорости, точности, надежности и доступности пакетной передачи IP. Рекомендация Y.1541 регламентирует классы обслуживания для сетей связи следующего поколения (NGN). В связи с особенностями приложений, в которых применяются сенсорные сети, требуется уточнение и изменение рекомендаций Y.1540 и Y.1541.

Важной особенностью беспроводных сенсорных сетей является самоорганизующаяся природа таких сетей. Локально сгруппированные узлы образуют между собой сеть и через один или несколько шлюзов могут передавать данные для последующей обработки, например, в сети связи общего пользования. Наличие соединений между сенсорными сетями и сетями связи общего пользования требует проведения расчета параметров данных шлюзов, для чего необходимо исследовать природу нагрузки, циркулирующей в беспроводных сенсорных сетях.

Исследованию характеристик сенсорных сетей, в первую очередь алгоритмов выбора головного узла в кластерах, были посвящены работы зарубежных и отечественных ученых I.F. Akyildiz, L. Borsani, M.Younis, W. Heinzelman, A. Salim, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, Д.А. Молчанова, В.А. Мочалова. Вопросам же

разработки и исследования моделей нагрузки в беспроводных сенсорных сетях до настоящего времени не уделялось должного внимания.

Передача данных является основным компонентом инфокоммуникационных систем и модели нагрузки имеют важнейшее значение для оценки их эффективности. Исследования телетрафика сетей связи, в том числе WAN, LAN сетей показали, что широко распространенные модели на базе Пуассоновского или связанных с ним процессов не в состоянии описать самоподобный характер нагрузки. Эти модели приводят к излишне оптимистичной оценке производительности инфокоммуникационных сетей, недостаточности выделения ресурсов для передачи и обработки данных и трудностям в обеспечении качества обслуживания.

**Цель работы и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состоит в разработке и исследовании моделей нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложений сбора данных со стационарных и смешанных (стационарных и подвижных) объектов. Поставленная цель достигается за счет решения следующих основных задач:

1. Анализ архитектуры, приложений и протоколов беспроводных сенсорных сетей.
2. Разработка комплекса параметров качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей с учетом рекомендации Y.1541 МСЭ-Т.
3. Разработка модели сети и формируемой сенсорными узлами нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных со стационарных объектов.
4. Разработка модели сети и формируемой сенсорными узлами нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных со стационарных и подвижных объектов.
5. Имитационное моделирование типовых сценариев обслуживания нагрузки в моделях беспроводных сенсорных сетей для приложений сбора данных со стационарных и смешанных (стационарных и подвижных) объектов.
6. Разработка моделей нагрузки с учетом фактора самоподобия и представление в форме вейвлетов Морле и Хаара.

**Методы исследования.** При проведении исследований применялись методы теории телетрафика, вейвлет преобразований и имитационного моделирования.

**Научная новизна.** Основными результатами диссертации, обладающими научной новизной, являются:

1. Разработана классификация нагрузки в соответствии с приложениями беспроводных сенсорных сетей.
2. Разработана модель агрегированного потока для приложений сбора данных со стационарных и смешанных (стационарных и подвижных) объектов.
3. Доказано, что агрегированная нагрузка в беспроводных сенсорных сетях для приложений сбора данных со стационарных объектов имеет средний уровень самоподобия и получена численная оценка значения параметра Херста.

4. Доказано, что агрегированная нагрузка в беспроводных сенсорных сетях для приложений сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов имеет средний уровень самоподобия и получена численная оценка значения параметра Херста.
5. Доказано, что нагрузка сигнализации и реконфигурации в беспроводных сенсорных сетях для приложений сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов имеет высокий уровень самоподобия и получена численная оценка значения параметра Херста.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Практическая ценность работы состоит в возможности использования полученных результатов для проектирования, планирования и расчета предельных характеристик беспроводных сенсорных сетей. Результаты работы используются в учебном процессе СПб ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, а также Сектором стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) при разработке рекомендаций.

На основе полученных результатов был представлен вклад в МСЭ-Т по дополнению рекомендации Y.1541 и раздел по характеристикам нагрузки для сенсорных сетей в рекомендацию Q.3925 МСЭ-Т.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на двух международных конференциях The 11th International Conference on Advanced Communication Technology ICACT 2009, The 11th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN 2011, на 62-й, 63-й, 64-й и 65-й научно-технических конференциях посвященных Дню радио (2007, 2008, 2009 и 2010 годы соответственно), а также на заседаниях кафедры «Сети связи» СПб ГУТ.

**Публикации.** Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках научно-технических конференций и в журналах отрасли. Всего опубликовано 10 работ, из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает содержание, список сокращений, введение, четыре главы, заключение, библиографический список и одно приложение. Работа содержит 136 страниц текста, 43 рисунка и библиографический список из 104 наименований, а также 1 приложение.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Классификация нагрузки в соответствии с приложениями беспроводных сенсорных сетей.
2. Модель сети и формирования нагрузки для приложения сбора данных со стационарных объектов
3. Модель сети и формирования нагрузки для приложения сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов.
4. Агрегированная нагрузка в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных со стационарных объектов имеет средний уровень самоподобия.

5. Агрегированная нагрузка в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов имеет средний уровень самоподобия.
6. Агрегированная нагрузка реконфигурации и сигнализации в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов имеет высокий уровень самоподобия.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся современные концепции развития сетей связи общего пользования, рассматриваются и классифицируются типовые приложения для беспроводных сенсорных сетей. В начале главы описана эволюция сетей связи, приведшая к возникновению сетей связи следующего поколения (NGN – Next Generation Networks), а также структуры входящие в состав данной концепции.

Распространение беспроводных сетей IEEE 802.11 привело к созданию самоорганизующихся сетей, работающих без инфраструктуры. Самоорганизующаяся сеть, как и все сети связи, состоит из сетей доступа и транзитной сети. Сеть доступа называется Ad Hoc (целевая сеть), а транзитная сеть – mesh (ячеистая). Узлы сети Ad Hoc не имеют функций маршрутизации и могут осуществлять взаимосвязь лишь с ближайшими узлами. В связи с этим достаточно часто узлы Ad Hoc называют дочерними.

В период интенсивного развития концепции NGN сетевые структуры беспроводных сенсорных сетей входили в NGN как составная часть. В то время считалось, что клиентскую база WSN составят сотни миллионов сенсорных узлов. Однако, стремительное развитие этой новой технологии, появление концепций Интернета вещей (IoT – Internet of Things) и Вэба вещей (WoT – Web of Things), привели к пересмотру перспектив развития сенсорных сетей и в соответствии с современными прогнозами число беспроводных устройств составит 7 триллионов на 7 миллиардов человек к 2017 – 2020 годам.

Сектор стандартизации Международного Союза Электросвязи в настоящее время рассматривает возможность замены концепции NGN на концепцию Умных Всепроницающих Сетей (SUN – Smart Ubiquitous Networks), включающую в себя концепцию NGN как одну из составных частей.

Далее в главе анализируются наиболее распространенных приложений для беспроводных сенсорных сетей, реализованных в различных странах. Рассматривая все эти приложения, можно заметить повторяющиеся шаблоны передаваемой нагрузки. Классифицируя данные шаблоны, выделим следующие основные виды нагрузки:

- Аварийная сигнализация - сообщения этого типа передаются с минимальными задержками и потерями.
- Речевые данные – данные, чувствительные к джиттеру и потерям.
- Протокольная сигнализация
- Данные обслуживания, такие как микропрограммы и конфигурации, а также статичные файлы, например фото - требуют гарантированной доставки, но не чувствительны к задержкам
- Данные телеметрии - допускают низкий уровень потерь
- Все остальные данные, передающиеся без каких либо гарантий.

Современные сети предоставляют многообразие услуг по единым каналам данных. При этом, каждая из сетей может иметь собственные требования по обеспечению качества обслуживания.

Для сохранения качества передаваемого голоса при одновременной передаче данных были введены классы обслуживания, а также нормируемые параметры качества обслуживания.

МСЭ-Т в рекомендации Y.1541 определяет 6 классов обслуживания для сетей с коммутацией пакетов на базе IP. Для определения параметров классов обслуживания используются нормируемые величины, рассмотренные в рекомендации Y.1540. Определяемые параметры применяются к услугам IP вида точка-точка, конечный узел к конечному узлу и сетевым частям, которые обеспечивают или способствуют предоставлению таких услуг. Транспортному потоку без установления соединения, уделяется особое внимание в данной рекомендации.

Рекомендация Y.1540 определяет четыре основных параметра, на основе которых можно описать классы качества обслуживания по IP сетям:

- средняя задержка пакетов (IPTD - IP Packet Time Delay)
- вариация задержки пакетов (джиттер) (IPDV - IP Packet Delay Variation)
- вероятность потери пакета (IPLR - IP Packet Lost Rate)
- вероятность ошибочной передачи пакета (IPER - IP Packet Error Rate)

Условия применения и назначение сенсорных сетей не позволяют в полной мере использовать классы обслуживания, регламентированные в рекомендации Y.1541. Сравнивая существующий набор классов спецификации Y.1541 и предложенный набор для беспроводных сенсорных сетей, можно определить наличие двух классов, не представленных в существующей рекомендации: данные аварийной сигнализации и данные требующие гарантированной доставки, но не чувствительные к задержкам. Важной особенностью данных аварийной сигнализации является то, что задержки при передаче таких данных могут вноситься только на физическом уровне.

Результаты данной классификации были представлены в виде вклада в МСЭ-Т по дополнению рекомендации Y.1541 и на их основе формировался раздел по характеристикам нагрузки для сенсорных сетей в проект рекомендации Q.3925.

**Во второй главе** проводится обзор существующих технологий для построения беспроводных сенсорных сетей. Особенностью данных сетей является то что они образуются множеством совместно функционирующих автономных устройств для

выполнения поставленной перед сетью задачи. Примерами таких задач служат сбор данных с датчиков, автоматизация технологических процессов, "умные" дома и т.д.

Основная задача WSN (Wireless Sensor Network – Беспроводные сенсорные сети) заключается в организации сети сенсоров с использованием большого числа относительно простых датчиков вместо традиционного подхода, предполагающего размещение нескольких дорогих и сложных модулей зондирования. Потенциальными преимуществами сенсорных сетей перед традиционным подходом являются: большая зона охвата, точность и надежность при меньших затратах.

Беспроводные персональные сети IEEE 802.15.4 нашли свое применение в области сенсорных сетей. Часто такие сети называют LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network – Низкоскоростная беспроводная персональная сеть).

При создании протокола IEEE 802.15.4 были предъявлены определенные требования: сеть должна была быть надежной, легкой в развертывании, с простым протоколом и низким электропотреблением, позволяющим работать длительное время устройствам с аккумуляторным источником питания. При этом, требования по дальности действия и скорости передачи достаточно просты.

Сети IEEE 802.15.4 можно охарактеризовать с помощью следующих параметров:

- Скорости передачи 250 kb/s, 40 kb/s и 20 kb/s
- Работа в топологии звезда или каждый-с-каждым
- Использование короткой 16-ти или расширенной 64 битной адресации
- Назначение гарантированных временных интервалов (Guaranteed Time Slot – GTS)
- Использование множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA-CA)
- Протокол с подтверждениями для гарантированной передачи
- Низкое потребление энергии
- Обнаружение сигнала (Energy Detection – ED)
- Индикатор качества канала связи (Link Quality Indicator – LQI)
- 16 каналов в полосе частот 2450 MHz, 10 каналов в полосе частот 915 MHz и 1 канал в полосе частот 868 MHz.

Далее в диссертации рассмотрены основные архитектурные принципы построения беспроводных сенсорных сетей, а также технологии, позволяющие организовать надежную и безопасную передачу данных в таких сетях.

Сети IEEE 802.15.4 поддерживают три типа архитектур построения: звезда, кластерное дерево и каждый-с-каждым (ячеистая). Рис. 1 демонстрирует доступные виды архитектур. В архитектуре звезда связь устанавливается между устройствами и единым центральным контроллером, называемым координатором. Устройства, как правило, имеют ряд сопутствующих применений и являются либо узлом начала передачи, либо узлом назначения для сеансов связи в сети. В сети с архитектурой дерева передача данных и сообщений управления через сеть осуществляется с использованием иерархической стратегии выбора маршрута и может производиться



под централизованным управлением, для чего на физическом уровне требуется использовать периодические сигналы маяков от координаторов IEEE 802.15.4. Ячеистые сети используют одноранговые связи, маршрутизация в таких сетях является децентрализованным, распределенным по сети процессом.

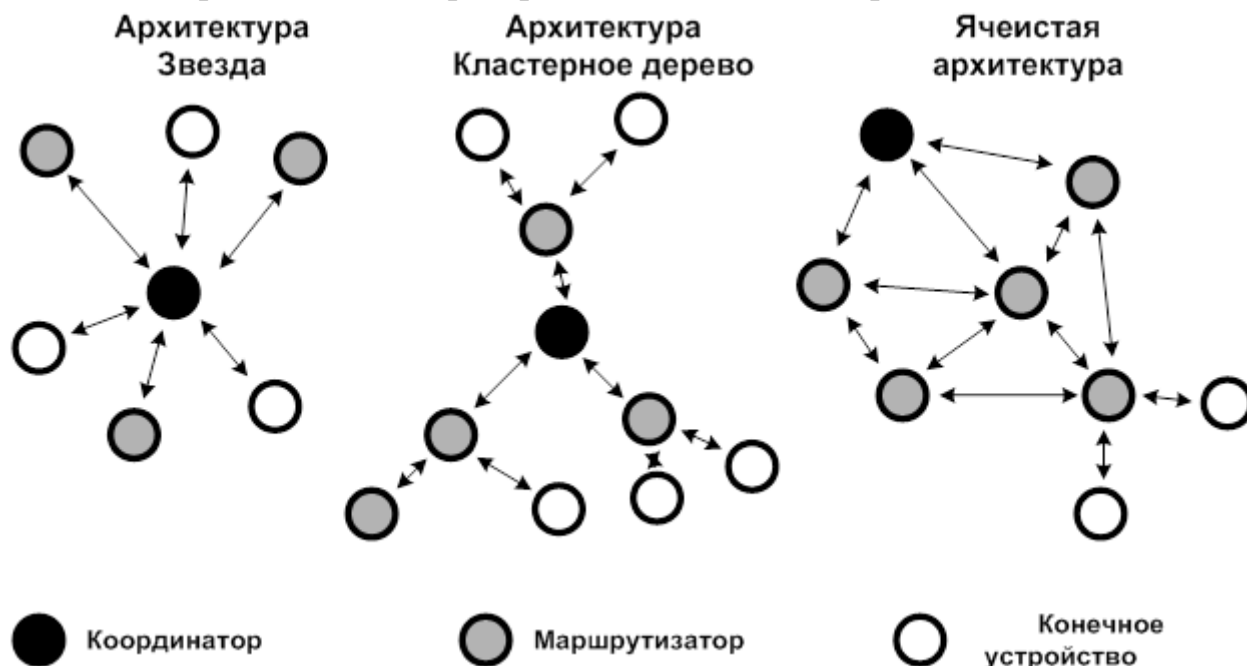


Рис. 1. Архитектуры для сетей IEEE 802.15.4

Для создания сложных архитектур, таких как кластерное дерево и ячеистой, требуется реализация сетевого уровня модели взаимодействия открытых систем. Существует несколько распространенных протоколов, наиболее известным из которых являются ZigBee и IETF 6LoWPAN. Во второй части главы дается описание этих протоколов.

Индустриальный стандарт ZigBee разработан организацией ZigBee Alliance, в состав которой входят ведущие разработчики оборудования и программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей. Последняя версия спецификации ZigBee была выпущена в 2007 году. При разработке стека протоколов ZigBee было учтено многое из опыта передовых коллективов разработчиков, работающих в сфере локальных, низкоскоростных, экономичных беспроводных сетей. Спецификация ZigBee обеспечивает стандартизацию организации беспроводной связи между устройствами от разных производителей в различных областях применения. Также спецификация предлагает методы, способствующие быстрому развертыванию и запуску распределенных беспроводных систем управления и наблюдения.

Рабочая группа IETF 6LoWPAN была сформирована для решения проблемы передачи IP пакетов поверх каналов IEEE 802.15.4 способом, удовлетворяющим открытым стандартам и предоставляющим взаимодействие с другими IP каналами и устройствами в той же мере, как и с устройствами IEEE 802.15.4.

Такое решение имеет множество преимуществ. Каждый сенсор в 6LoWPAN сети имеет персональный IPv6 адрес. Это позволяет многим компаниям производить LR-WPAN устройства, которые могут работать вместе в одной сети, позволяет

взаимодействовать данным устройствам, работать с сетевыми компьютерами и оборудованием, которое уже существует. Каждый узел сенсорной сети становится доступен из внешних сетей по IP адресу. Это избавляет от необходимости иметь комплексные шлюзы для каждого локального IEEE 802.15.4 протокола, множества адаптеров, используемых существующими приложениями для связи через эти шлюзы, упрощает множество специфичных для шлюзов процедур аутентификации и безопасности. Множество устоявшихся, основанных на IP протоколе программных инструментов, таких как ping, traceroute, SNMP может быть сразу же использовано для объединения в сеть и обслуживания LR-WPAN устройств. Также на базе IP могут быть легко реализованы функции NAT (подмена адресов), распределение нагрузки, кэширование. Существующие модели передачи данных на программном уровне и сервисы на базе HTTP/XML/SOAP позволяют упростить процесс разработки приложений для LR-WPAN сетей и унифицировать интеграцию устройств в существующую корпоративную сеть при использовании 6LoWPAN. Создание этого протокола способствовало продвижению работ по технологии IoT.

**Третья глава** посвящена разработке моделей беспроводных сенсорных сетей и формируемой сенсорными узлами нагрузки, имитационному моделированию типовых сценариев для приложения сбора данных. В качестве инструмента моделирования используется пакет Network Simulator 2 (NS-2).

Пакет имитационного моделирования NS-2 является результатом многолетней работы исследователей и разработчиков, координируемых из университета Беркли. Это дискретный симулятор событий, нацеленный на моделирование работы проводных и беспроводных сетей. Пакет позволяет моделировать TCP/UDP соединения, различные протоколы маршрутизации, юникаст и мультикаст передачу данных. NS-2 написан на языке программирования C++ и скриптовом языке Otcl.

Язык Otcl используется пользователями системы для описания сценариев, включающих в себя конфигурацию сети (количество узлов, их типы и способы взаимодействия между собой), используемые протоколы, а также модели перемещения узлов. Разработав сценарий в виде tcl файла, пользователь передает его на обработку непосредственно симулятору. Ядро NS-2, которое реализует все поддерживаемые технологии, для более быстрого выполнения написано на языке высокого уровня C++. Обработав сценарий из tcl файла, пакет NS-2 генерирует два трейс файла – служебный, который может использоваться для обработки данных (расчет задержек, пропускной способности и т.д.) и сценарий визуализации, который может быть загружен в программу Network Animator (NAM) для интерактивного отображения происходящего.

После рассмотрения возможных приложений было выбрано наиболее распространенное приложение по сбору телеметрических данных со стационарных и смешанных (стационарных и подвижных) объектов.

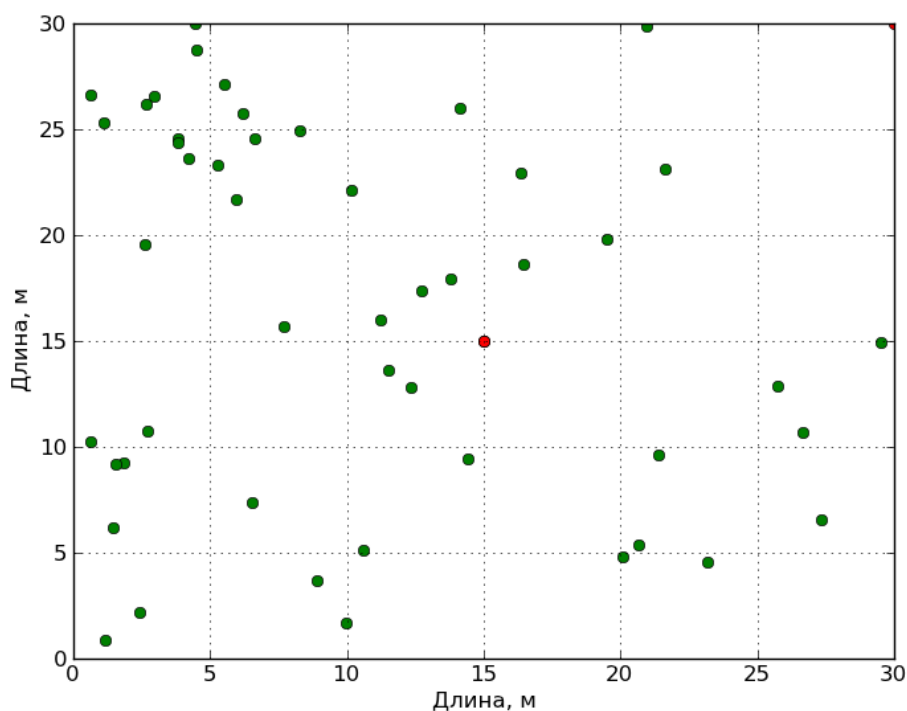
В качестве основы для моделирования выбрано сенсорное поле 30 на 30 метров, на котором случайным образом размещаются узлы сенсорной сети. Узел сбора данных - шлюз размещен в центре поля, при внедрении на промышленных объектах гарантированная дальность распространения сигнала составляет порядка

15-20 метров, соответственно предложенная модель описывает сеть вокруг одного узла сбора данных. В реальности таких узлов может быть несколько, они работают параллельно и обслуживают крупную сеть датчиков.

На данной территории случайным образом размещается 50 датчиков и в случайный момент времени они начинают передавать сообщения с заданной частотой. При выборе времени начала передачи сообщений также выбирается частота повторной передачи: 15, 30, 45, 60 секунд. Данные интервалы выбраны на основе опубликованных рекомендаций IETF и исследований Международного общества автоматизации (International Society of Automation – ISA).

В случае смешанных узлов первоначально алгоритм работает точно таким же образом, но для половины узлов задаются случайные координаты, куда они перемещаются с течением времени.

В результате получаем карту размещения датчиков, на рис. 2 приведен ее пример.



**Рис. 2. Размещение датчиков на плане**

Для реализации поставленных задач используется язык программирования Python, с помощью которого генерируются скрипты на языке tcl, которые непосредственно передаются интерпретатору NS-2. Язык программирования Python является скриптовым языком общего назначения, он обладает ясным и понятным синтаксисом, и потому легко учится и хорошо подходит для быстрой разработки. Являясь универсальным языком, Python обладает богатой стандартной библиотекой, а также огромным набором модулей, написанных третьими лицами.

Алгоритм моделирования представлен на Рис. 3.

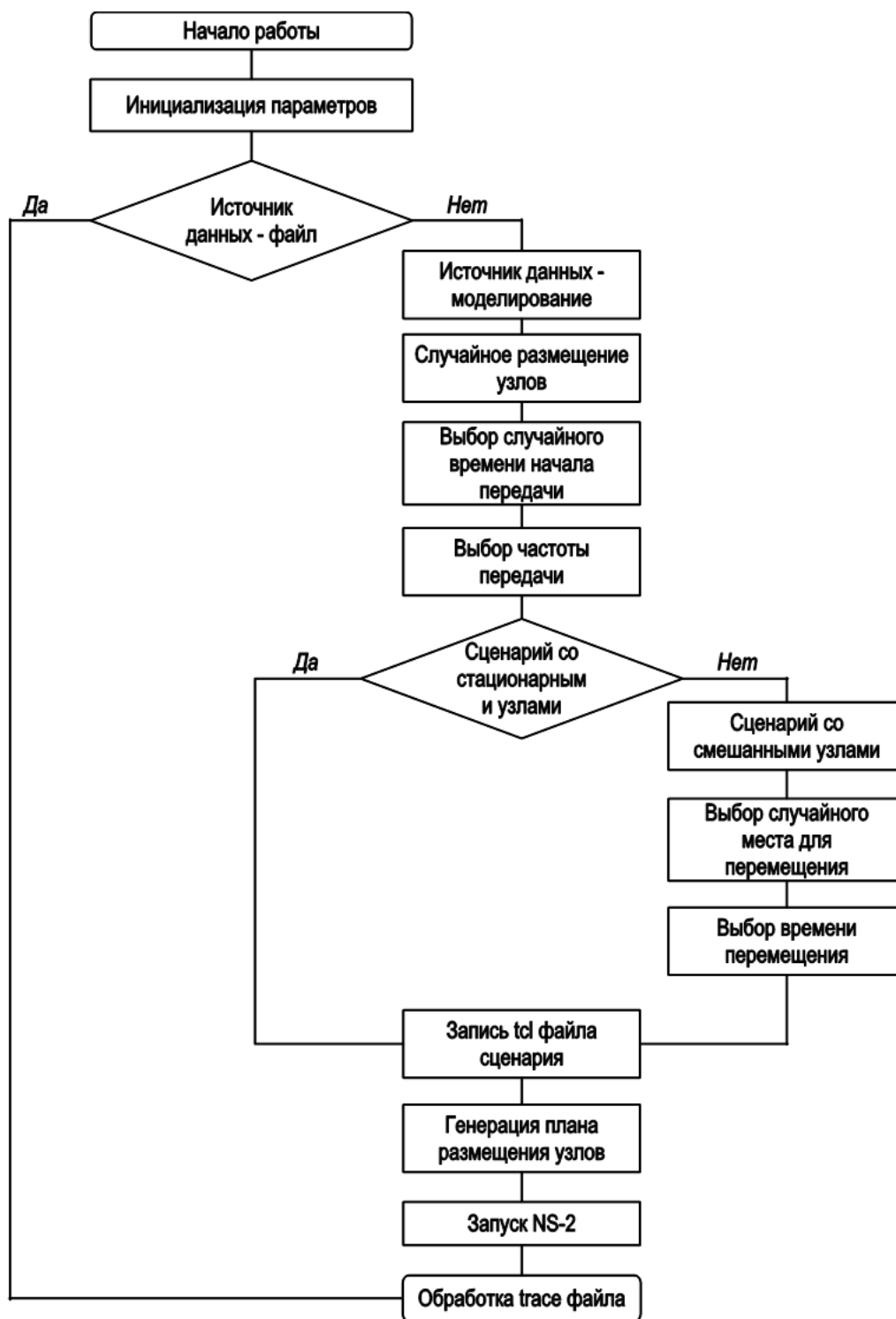


Рис. 3. Алгоритм моделирования

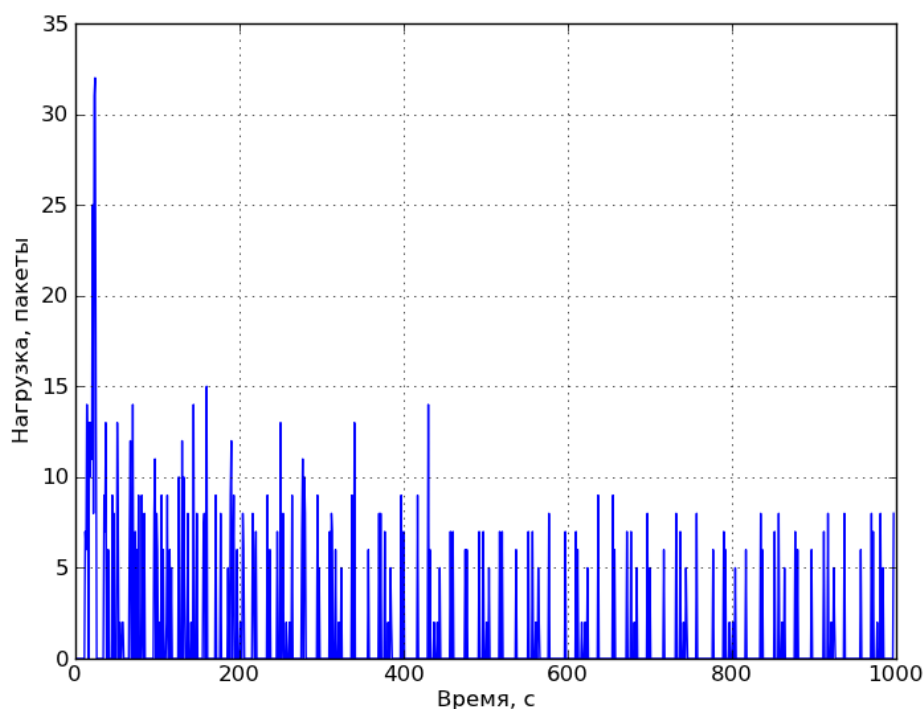
**Четвертая глава** посвящена исследованию самоподобных свойств нагрузки в беспроводных сенсорных сетях.

Данные, полученные в третьей главе, обрабатываются с помощью математических библиотек языка Python, а именно NumPy и SciPy, для визуализации используется библиотека Matplotlib. NumPy – это расширение языка Python, добавляющее поддержку больших многомерных массивов и матриц вместе с большой библиотекой высокоуровневых математических функций для операций с

этими массивами. SciPy – это библиотека алгоритмов и математических инструментов, которые могут потребоваться при проведение расчетов с помощью языка Python. SciPy содержит инструменты для оптимизации, линейной алгебры, интегрирования, быстрого преобразования Фурье, обработки сигналов и изображений, а также других задач, решаемых в научной среде. Matplotlib – это библиотека для визуализации сложных данных, позволяет строить множество типов графиков. Библиотека разрабатывалась очень похожей на средства пакета математических вычислений MATLAB, что позволяет быстро портировать код для данного пакета.

Результат работы NS-2 представлен в виде trace файла содержащего сведения обо всех пакетах, переданных в моделируемой сети. Каждая запись содержит временную метку, тип пакета, источник и приемник сообщения, а также дополнительные служебные данные. Построчно анализируя данный файл можно получить всю необходимую информацию.

В первую очередь необходимо оценить изменение количества пакетов, переданных на шлюз с течением времени. Длительность моделирования разбивается на отрезки длиной в заданное количество секунд (данный параметр может быть изменен при запуске процедуры). При анализе трейс файла выбираются пакеты с адресом шлюза и, рассматривая время поступления пакета, можно отнести его к одному из интервалов поступления. Полученные данные сохраняются для последующего использования, а также могут быть визуализированы для наглядного представления. Пример агрегации с интервалом в 1 секунду представлен на рис.4.



**Рис. 4. Пример агрегации данных**

Данные о количестве пакетов, полученные ранее, используются для расчета коэффициента Херста, характеризующего степень самоподобия нагрузки в сети. Существует несколько способов для расчета коэффициента Херста, в данной работе был выбран наиболее распространенный - метод анализа графика изменения дисперсии. Суть метода заключается в исследовании медленно затухающей дисперсии самоподобного агрегированного процесса. Для самоподобного процесса связь между дисперсией объединенного процесса  $X^{(m)}$  и размером блока  $m$  представляется следующим образом:

$$\sigma^2(X_t^{(m)}) \sim \alpha m^{-\beta} \text{ при } m \rightarrow \infty$$

где  $\alpha$  – конечная положительная константа. Взяв логарифм от обеих частей, мы получаем зависимость:

$$\log(\sigma^2(X_t^{(m)})) \sim -\beta \cdot \log(m) + \log(\alpha) \text{ при } m \rightarrow \infty$$

Вычислив  $\log(\sigma^2(X_t^{(m)}))$  для различных значений  $m$  и графически отображая зависимость от  $\log(m)$ , можно получить значение  $\beta$ .  $\beta$  определяется как отрицательный наклон прямой, подобранной по методу наименьших квадратов. Для связи коэффициента Херста  $H$  с полученным  $\beta$  используется следующая формула:

$$H = 1 - \beta/2$$

Рассмотренный метод анализа продемонстрирован на рис.5:

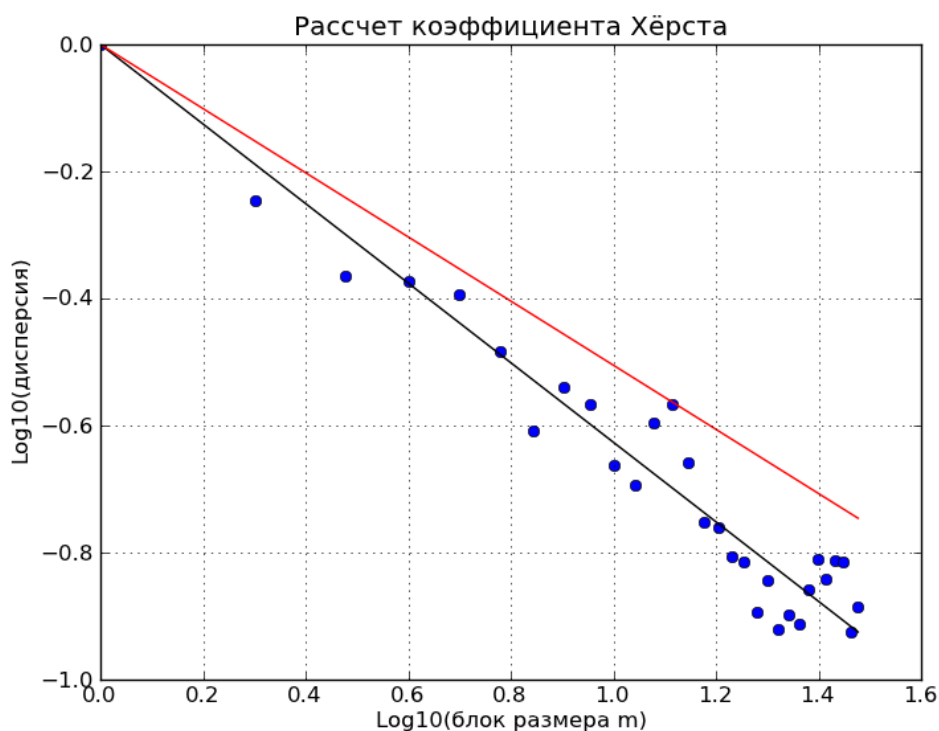


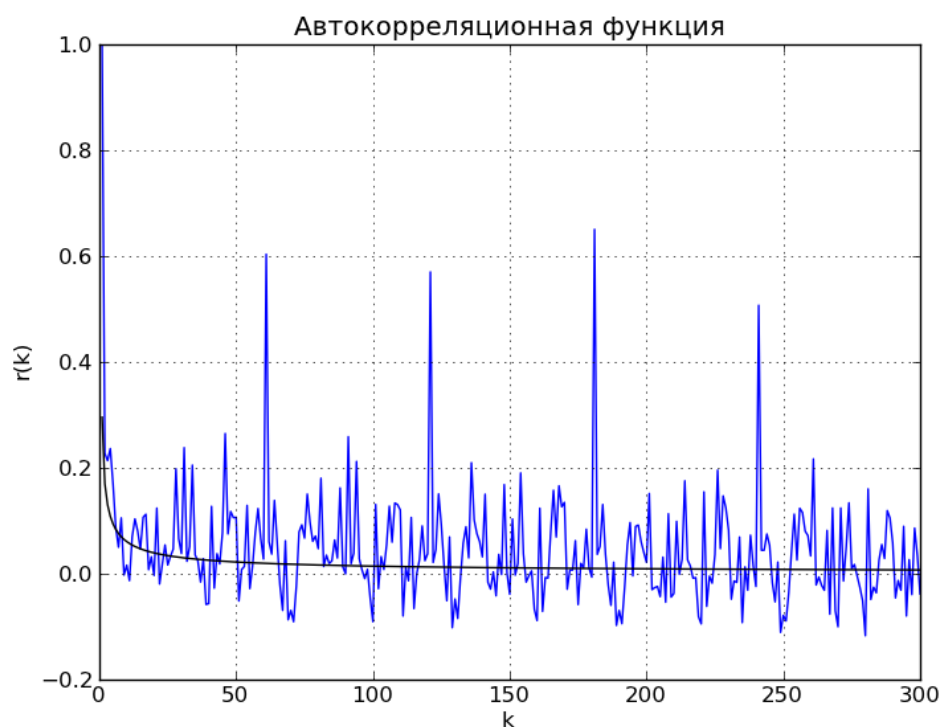
Рис. 5. Метод анализа графика изменения дисперсии

Автокорреляционная функция (АКФ) характеризует связь между значениями одного и того же случайного процесса в разнесенные моменты времени. Считается, что процесс обладает медленно убывающей зависимостью (МУЗ), если он характеризуется АКФ, которая убывает гиперболически при увеличении временной задержки. В противоположность МУЗ существует понятие быстро убывающей зависимости (БУЗ).

Расчет коэффициента Херста, можно получить график аппроксимации АКФ с помощью формулы:

$$r(k) = 1/2 \cdot ((k+1)^{2H} + 2k^{2H} - (k-1)^{2H})$$

На рис. 6 приведен пример аппроксимации АКФ для данных моделирования.

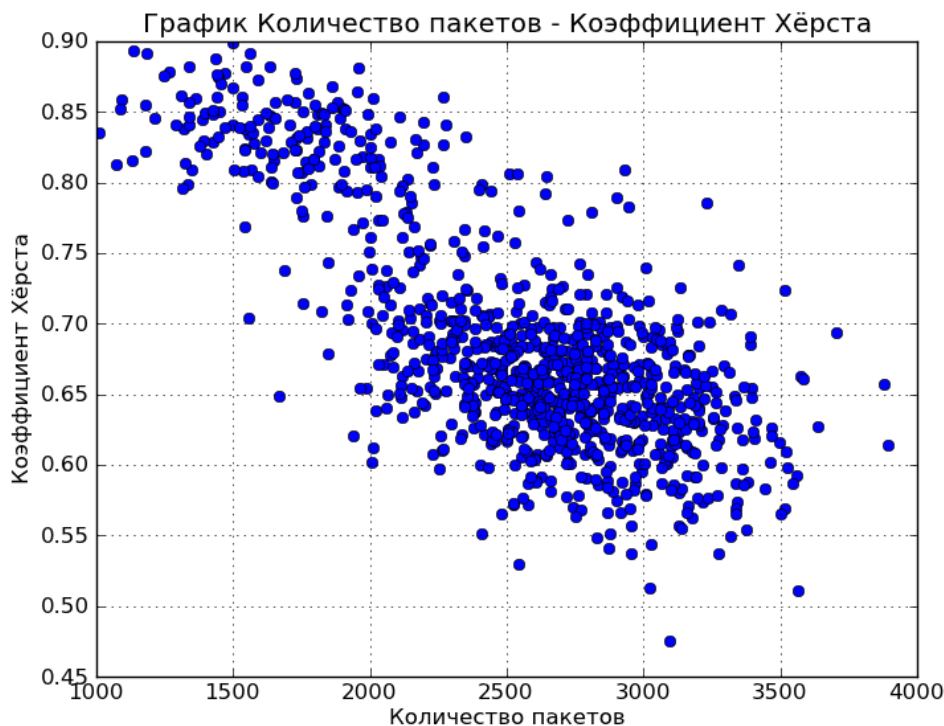


**Рис. 6. Аппроксимация АКФ**

Для оценки параметра Херста был выполнен многократный запуск моделирующего сценария. Сценарий со стационарными объектами был выполнен 1000 раз, а сценарий со смешанными объектами был выполнен 3000 раз. Это позволило получить численные оценки среднего и дисперсии параметра Херста.

Среднее значение параметра Херста для сценария со стационарными объектами составляет 0.675, что говорит о том, что нагрузка от узлов сенсорной сети для приложения сбора данных со стационарных объектов обладает свойствами самоподобия со средним уровнем самоподобности.

Среднее значение параметра Херста для сценария со смешанными объектами составляет 0.687, что говорит о том, что нагрузка от узлов сенсорной сети для приложения сбора данных со смешанных объектов также обладает свойствами самоподобия со средним уровнем самоподобности. При исследовании результатов многократного запуска сценария со смешанными типами узлов был построен график зависимости коэффициента Херста от общего количества событий во время запуска сценария (рис. 7).



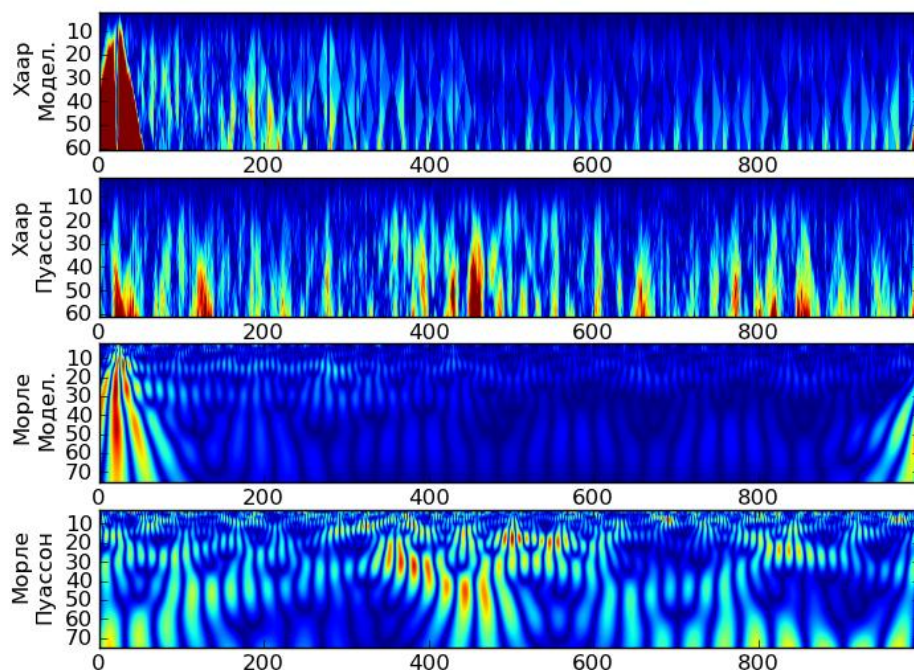
**Рис. 7. Значения коэффициента Херста**

На приведенном графике отчетливо выделяются два кластера, один представляет собой нагрузку реконфигурации и сигнализации, а второй все типы нагрузки – реконфигурацию, сигнализацию и телеметрию.

Можно рассчитать среднее значение параметра Херста для нагрузки реконфигурации и сигнализации, оно составляет 0.829. Таким образом, нагрузка реконфигурации и сигнализации для приложения сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов обладает свойствами самоподобия с высоким уровнем самоподобности.

Одним из методов диагностирования самоподобия нагрузки может служить визуализация в виде вейвлета. В работе выполнено вейвлет преобразование нагрузки с помощью вейвлетов Морле и Хаара, для наглядности результат преобразования представлен в виде сравнения с Пуассоновским потоком.





**Рис. 8. Вейвлет анализ нагрузки**

**В Приложении** к диссертационной работе приведены исходные тексты всех разработанных скриптов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны и исследованы модели нагрузки, а также характеристики качества обслуживания трафика в беспроводных сенсорных сетях. Основные результаты данной работы сводятся к следующим положениям:

1. Предложена классификация нагрузки и определены соответствующие параметры для каждого из классов обслуживания в соответствии с типовыми приложениями для беспроводных сенсорных сетей.

2. Разработаны предложения в рекомендацию МСЭ-Т Y.1541, которые включают в себя требования к классам и параметрам качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей.

3. Разработан раздел по характеристикам нагрузки для сенсорных сетей для рекомендации МСЭ-Т Q.3925

4. Разработана модель сети и формирования нагрузки в беспроводной сенсорной сети для приложения сбора данных со стационарных объектов.

5. Разработана модель сети и формирования нагрузки в беспроводной сенсорной сети для приложения сбора данных со смешанных (стационарных и подвижных) объектов.

6. При моделировании различных топологий сенсорных сетей при обслуживании упомянутых моделей нагрузки было установлено, что во всех случаях существует две фазы обслуживания нагрузки: переходный процесс и стационарный

процесс. При этом, переходный процесс для рассматриваемых приложений не превышает 200 с.

7. При моделировании обслуживания нагрузки со смешанных (стационарных и подвижных) объектов, в приложениях сбора данных переходные процессы более низкого уровня возникают на протяжении всего времени моделирования.

8. Доказано, что агрегированная нагрузка в сенсорных сетях в приложениях сбора данных обладает свойством самоподобия со средним уровнем самоподобности, что позволяет более точно описать модель нагрузки и может быть применено при расчете шлюзов между сенсорными сетями и сетями связи общего пользования.

9. Доказано, что нагрузка реконфигурации и сигнализации в сенсорных сетях в приложениях сбора со смешанных (стационарных и подвижных) объектов данных обладает свойством самоподобия с высоким уровнем самоподобности.

10. С помощью статистического моделирования получены оценки параметра Херста (среднее и дисперсия). Для моделей нагрузки приложений сбора данных со стационарных узлов среднее значение равно 0.675, для смешанных узлов среднее значение равно 0.687, а для нагрузки реконфигурации и сигнализации значение равно 0.829.

11. Полученные результаты моделирования также представлены в форме вейвлетов Морле и Хаара, что подтверждает наличие самоподобия для упомянутых процессов.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. В.В. Кондратьев, А.В. Прокопьев. RFID как основа глобальной сети взаимодействия бизнес приложений. 62-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2007

2. В.В. Кондратьев, А.В. Прокопьев. Позиционирование и локализация в сенсорных сетях. 62-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2007

3. А.В. Прокопьев. Архитектура стека протоколов ZigBee. 63-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2008

4. В.В. Кондратьев, А.В. Прокопьев. Перспективы использования протокола 6LoWPAN в сетях IEEE 802.15.4. 63-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2008

5. А.В. Прокопьев. UDP/IP адаптация программного протокола ZigBee – протокол CAP. 64-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2009

6. А.В. Прокопьев. Моделирование информационных потоков в сенсорных сетях. 64-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2009

7. А.В. Прокопьев. Перспективы использования протокола 6LoWPAN в сетях IEEE 802.15.4. «ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ», No 1, 2009 (из перечня ВАК)

8. A. Koucheryavy, A. Prokopiev. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks, The 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2009). IEEE Proceedings, February 2009 Korea.

9. А.В. Прокопьев. Самоподобие нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных. 65-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. Апрель 2010

10. A. Koucheryavy, A.Prokopiev. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Telemetry Applications, The 11th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN 2011. August 2011 Saint-Petersburg. Springer LNCS 6869, p.287 (из перечня ВАК)

---

Подписано к печати 29.03.2012.

Объем 1 печ.л. Тираж 80 экз. Зак.

---

Тип. СПбГУТ, 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61