

На правах рукописи



Выборнова Анастасия Игоревна

Исследование характеристик трафика в беспроводных сенсорных сетях

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные оппоненты: Никольский Игорь Евгеньевич,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Центральное научно-производственное
объединение «Ленинец», начальник отдела № 320

Андреев Сергей Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
Российский университет дружбы народов,
доцент кафедры «Прикладная информатика
и теория вероятностей»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 17 декабря 2014 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 219.004.02 при Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.sut.ru и в библиотеке Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» по адресу Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 65.

Автореферат разослан 5 ноября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



В.Х. Харитонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современный этап становления информационного общества характеризуется интенсивным развитием технологий пост-NGN, в том числе самоорганизующихся сетей, в которых абонентами являются не только люди, но и разнообразные устройства, осуществляющие информационное взаимодействие друг с другом без непосредственного участия человека, в рамках Machine-to-Machine communication (M2M).

В соответствии с концепцией Интернета Вещей (ИВ) и рядом прогнозов в ближайшем будущем во всемирную сеть связи будет включено несколько триллионов телекоммуникационных устройств, причем большая часть из них будет так называемыми «вещами», то есть, в соответствии с определением Международного союза электросвязи, данным в рекомендации Y.2069, «предметами физического или информационного мира, которые могут быть идентифицированы и интегрированы в сети связи».

Среди телекоммуникационных устройств, предназначенных не для взаимодействия между людьми, а для взаимодействия между человеком и некой неодушевленной «вещью» или между двумя «вещами», значительную долю составляют разнообразные сенсорные устройства, способные не только получать информацию о различных свойствах окружающей среды и находящихся в ней объектах, но и передавать эту информацию по беспроводным сетям связи другим устройствам.

Ряд специфичных требований к подобным устройствам, касающихся низкого потребления энергии, небольшой стоимости, простоты развертывания и самоорганизации узлов, привел к созданию в последние годы отдельного направления развития сетей связи – беспроводных сенсорных сетей (БСС), причем перспективы крайне широкого распространения таких сетей, использования их во всех областях человеческой деятельности отражены в другом общепринятом наименовании подобных сетей – всепроникающие (или повсеместно распространённые) сенсорные сети.

В связи с этим в настоящее время представляется крайне актуальным всестороннее исследование различных аспектов функционирования БСС, в том

числе характеристик трафика, производимого в БСС, а также создание адекватных моделей поступления трафика от отдельных сенсорных узлов и БСС в целом.

Степень разработанности темы. В настоящий момент в области исследования трафика БСС существует ряд исследовательских работ, которые можно условно разделить на два направления.

Первая группа исследовательских работ рассматривает вопросы моделирования трафика данных, создаваемого отдельными узлами сенсорных сетей. Следует отметить, что информационный трафик сенсорных узлов в значительной мере определяется приложением сенсорной сети, сценарием ее работы. При этом для существенной части приложений БСС, связанных с телеметрией, сенсорный узел отправляет одинаковые по объему пакеты данных через равные промежутки времени, то есть информационная составляющая трафика таких узлов может описываться моделью с постоянной скоростью отправки данных (Constant Bit Rate, CBR).

Наличие относительно небольшого числа исследовательских работ в данном направлении, вероятно, связано с тем, что для многих приложений и сценариев работы БСС модель CBR действительно является подходящей и достаточной. В то же время существует вторая большая группа БСС, приложения и сценарии работы которых подразумевают отправку сенсорными узлами информационных пакетов по требованию (on demand) или при возникновении внешних событий (event-driven). При этом трафик сенсорных узлов таких сетей будет в значительной мере зависеть от моментов возникновения запросов и событий, и далеко не во всех случаях может быть аппроксимирован моделью с постоянной скоростью отправки данных.

В ряде исследовательских работ (I.F. Akyildiz, P. Wang, Q. Wang, T. Zhang, G. Messier, I.G. Finvers) приведены результаты анализа трафика отдельных сенсорных устройств, в том числе медицинского назначения и отслеживания случайно движущейся цели, а также предложены аналитические модели для трафика таких узлов. Однако данные работы далеко не исчерпывают весь перечень возможных и перспективных приложений БСС.

Второе направление работ касается характеристик общего трафика в БСС. В ряде отечественных и зарубежных работ (А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, I.F. Akyildiz, P. Wang,) приводятся данные, показывающие наличие свойств самоподобия и долговременной зависимости общего (поступающего от всех сенсорных узлов) трафика в БСС, предназначенных для телеметрии и, в том числе, включающих в себя мобильные узлы.

Объектом исследования являются беспроводные сенсорные сети. Предметом исследования являются модели и методы оценки и генерации трафика в беспроводных сенсорных сетях, предназначенных для слежения за целью.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертации является исследование характеристик трафика, возникающего в беспроводных сенсорных сетях слежения за целью, и их зависимости от различных параметров таких сетей и сценариев их работы.

Для выполнения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие задачи:

- анализ уровня исследования беспроводных сенсорных сетей, определение наиболее важных архитектурных особенностей и наиболее широко применяемых и перспективных протоколов;
- анализ разработанных к настоящему моменту моделей трафика с учетом применимости их для беспроводных сенсорных сетей слежения за целью;
- разработка аналитической модели трафика сенсорного узла БСС, предназначенной для слежения за линейно движущейся целью;
- создание имитационной модели трафика сенсорного узла БСС, предназначенной для слежения за линейно движущейся целью, для проверки корректности созданной аналитической модели и получения данных для дальнейшего имитационного моделирования;
- анализ существующих методов определения характеристик трафика, в том числе анализ методов определения степени самоподобия и долговременной зависимости трафика сетей связи;
- разработка и программная реализация модели оценки характеристик трафика БСС на основе определения средней интенсивности трафика и анализа

его степени самоподобия и долговременной зависимости с помощью анализа нормированного размаха и локального метода Виттла;

– создание имитационной модели беспроводной сенсорной сети (отдельного кластера сети) слежения за целью и двух сценариев ее работы: для цели, движущейся случайным образом, или цели, движущейся линейно;

– проведение имитационного моделирования беспроводной сенсорной сети слежения за целью для выяснения влияния параметров такой сети на трафик, поступающий на шлюз сети.

Научная новизна. Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

– разработана модель трафика сенсорного узла БСС, отличающаяся от известных тем, что она адекватно отражает трафик сенсорного узла, используемого для слежения за линейно движущейся целью;

– предложена комплексная модель оценки характеристик трафика на шлюзе БСС слежения за целью, основывающаяся на измерении интенсивности трафика и отличающаяся тем, что в дополнение к известным методам оцениваются и степень самоподобия, и долговременная зависимость, причем последние оцениваются комплексно с помощью анализа нормированного размаха и локального метода Виттла;

– предложен метод генерации трафика с заданными степенью самоподобия и долговременной зависимости на основе ON-OFF модели, который в отличие от известных методов позволяет получить искомые параметры на основе изменения скорости передачи данных в течение ON-интервалов с использованием средней длительности этих интервалов без необходимости учета формы распределения.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке и исследовании модели трафика узла БСС слежения за линейно движущейся целью, в разработке комплексной модели оценки характеристик трафика на шлюзе БСС слежения за целью, а также в исследовании трафика на шлюзе БСС. Практическая ценность работы состоит в возможности использования полученных результатов для проектирования, планирования и расчета параметров БСС слежения за целью и сценариев их работы. Также перспективы практического использования имеет

предложенный в работе метод генерации трафика с заданной степенью самоподобия и долговременной зависимости при помощи управления скоростью передачи пакетов группой узлов в течение ON-интервалов с использованием средней длительности этих интервалов без необходимости учета формы распределения.

Результаты работы использованы при проведении научно-исследовательских работ в Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, а также в учебном процессе кафедры Сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций и проведении практических занятий и лабораторных работ по курсам «Интернет Вещей: сенсорные и медицинские сети» и «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций».

Методология и методы исследования. Методология исследования построена на общенаучных принципах объективности и всесторонности. В качестве методов исследования использовался системный подход и метод анализа (с целью создания аналитической модели трафика сенсорного узла), также широко применялся метод моделирования (как для верификации созданной аналитической модели, так и для получения данных о зависимости трафика, приходящего на шлюз, от различных параметров сценария БСС).

В качестве инструментов моделирования использовался программный пакет Network Simulator 2, для обработки результатов моделирования использовался язык программирования Python и различные библиотеки для данного языка, в целях визуализации полученных результатов применялось программное обеспечение Microsoft Excel. Для создания аналитической модели трафика сенсорного узла и исследования степени самоподобия и долговременной зависимости трафика использовались методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

– модель трафика сенсорного узла БСС, предназначенных для слежения за линейно движущейся целью;

– комплексная модель оценки характеристик трафика на шлюзе БСС слежения за целью, использующая оценку средней интенсивности трафика, а также степени его самоподобия и долговременной зависимости;

– метод генерации трафика с заданными степенью самоподобия и долговременной зависимости на основе ON-OFF модели.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается соответствием результатов имитационного и аналитического моделирования, а также схожестью оценок характеристик трафика, полученных разными методами.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 12-й и 14-й международных конференциях «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking NEW2AN» (Санкт-Петербург, 2012, 2014), на 66-й и 67-й конференции СПбНТОРЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2011, 2012), III Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2014), а также на заседаниях кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации. Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках докладов научно-технических конференций, в том числе международных, а также в журналах отрасли. Всего опубликовано 8 работ, из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, словарь терминов, список литературы, включающий 68 наименований, список иллюстративного материала и пять приложений. Работа изложена на 143 страницах без приложений, содержит 60 рисунков и 15 таблиц.

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно или в соавторстве. В работах, выполненных в соавторстве, участие автора является определяющим.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, кратко описано состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна и практическая ценность результатов, описана область их применения, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы, описана структура диссертации и ее объем.

В первой главе диссертационной работы проанализированы особенности беспроводных сенсорных сетей, специфичные требования к таким сетям и их отличия от других типов сетей связи, рассмотрены различные аспекты архитектуры сенсорных узлов и БСС, проанализированы актуальные протоколы и приложения для данных сетей, а также рассмотрены перспективы их развития. Показано, что одними из самых широко используемых и перспективных протоколов и стандартов для БСС являются IEEE 802.15.4 (на физическом и канальном уровнях), IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN, на сетевом уровне), Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV, в качестве протокола маршрутизации), а при проектировании БСС следует учитывать такие их особенности, как необходимость низкого энергопотребления узлов и возможность их самоорганизации в многоинтервальную ячеистую ad hoc сеть.

Вторая глава диссертационной работы посвящена изучению и описанию моделей трафика сенсорных узлов.

В первой части главы рассматриваются существующие модели трафика сенсорных узлов: модель с постоянной скоростью передачи (CBR, Constant Bit Rate), подходящая для приложений телеметрии; модель с регулярной отправкой пакетов, длины которых распределены в соответствии с нормальным законом, подходящая для передачи биометрической информации; а также ON-OFF модель с длительностями ON и OFF интервалов, имеющими распределение Парето,

которая подходит для описания трафика узла, следящего за целью со случайной траекторией движения.

Вторая часть главы содержит описание предложенной автором модели трафика сенсорного узла БСС, предназначенной для слежения за линейно движущейся целью. Данная модель также базируется на ON-OFF модели, в которой интервалы ON, в течение которых сенсорный узел передает пакеты с постоянной скоростью, соответствуют присутствию цели в зоне сканирования сенсорного узла, а интервалы OFF, в течение которых данные узлом не отправляются, соответствуют нахождению цели за пределами зоны сканирования узла.

Пусть X – непрерывная случайная величина, представляющая расстояние между прямой, по которой проходит цель через сенсорную область и параллельной ей касательной к сенсорной области.

Очевидно, что для случая проходящей через сенсорную область цели X имеет равномерное распределение в области $\left(0; \frac{2R}{V}\right)$, то есть:

$$f_x = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ \frac{V}{2R}, & 0 < x < \frac{2R}{V}, \\ 0, & x \geq \frac{2R}{V}, \end{cases}$$

где R – радиус сенсорной области узла, V – скорость движения цели.

Пусть Y – непрерывная случайная величина, представляющая длительность прохождения цели по хорде, возникающей при линейном прохождении цели через сенсорную область. Величина Y связана с X следующим соотношением:

$$y(x) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{R}{V}\right)^2 - \left(x - \frac{R}{V}\right)^2}, \quad x \in \left(0; \frac{2R}{V}\right).$$

При этом значения $Y(x)$ также лежат в интервале $\left(0; \frac{2R}{V}\right)$, но распределены по этому интервалу неравномерно.

Плотность вероятности распределения случайной величины Y определяется из выражения:

$$f_Y(x) = (y^{-1}(x))' \cdot f_X(y^{-1}(x)), \quad (1)$$

где $y^{-1}(x)$ – функция, обратная $y(x)$, а $(y^{-1}(x))'$ – ее производная.

Функция, обратная $y(x)$, имеет следующий вид:

$$y^{-1}(x) = \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{2R}{V}\right)^2 - (x)^2} + \frac{2R}{V}.$$

Ее производная:

$$(y^{-1}(x))' = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{2R}{V}\right)^2 - (x)^2}} \cdot (-2x) = \frac{x}{\sqrt{\left(\frac{2R}{V}\right)^2 - (x)^2}}.$$

Тогда в соответствии с выражением (1) плотность вероятности длительности ON-интервала будет равна:

$$f_Y = \begin{cases} 0, & y \leq 0 \\ \frac{x}{\sqrt{\left(\frac{2R}{V}\right)^2 - (x)^2}} \cdot \frac{V}{2R}, & 0 < y < \frac{2R}{V}, \\ 0, & y \geq \frac{2R}{V}, \end{cases}$$

где R – радиус сенсорной области узла, V – скорость движения цели.

Корректность данного вывода подтверждается результатами имитационного моделирования, выполненными при помощи разработанной автором модели. Сравнение теоретических результатов и данных имитационного моделирования приведено на рисунке 1.

Также на основании данных имитационного моделирования определяется, что длительности OFF-интервалов имеют распределение с тяжелым хвостом и могут быть аппроксимированы распределением Парето, как показано на рисунке 2.

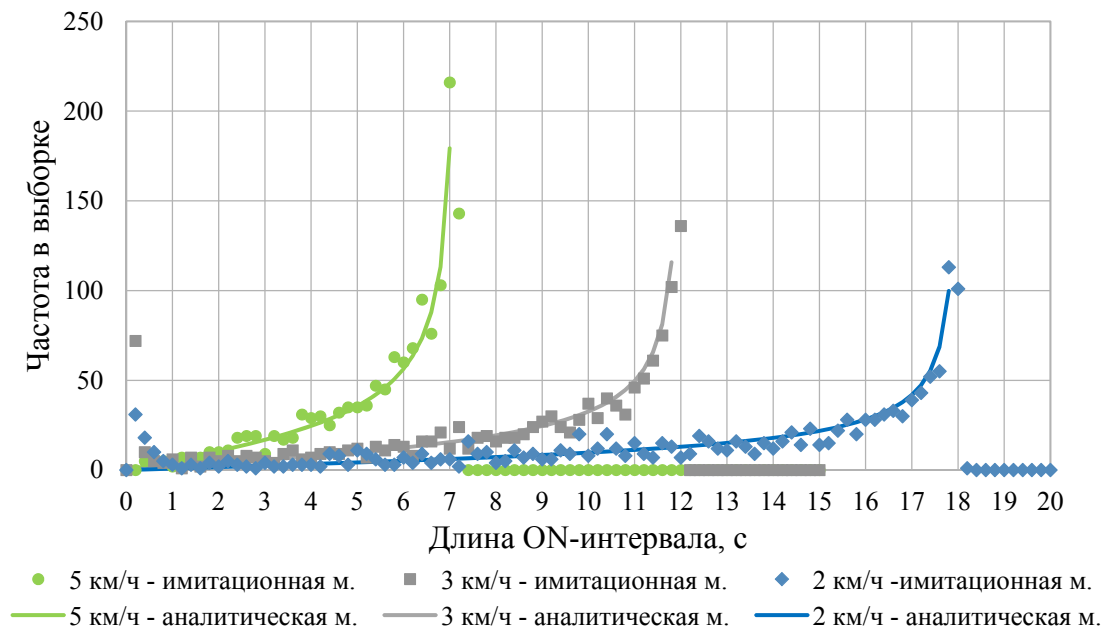


Рисунок 1 – Распределение длин ON-интервалов: сравнение аналитической модели с результатами имитационного моделирования

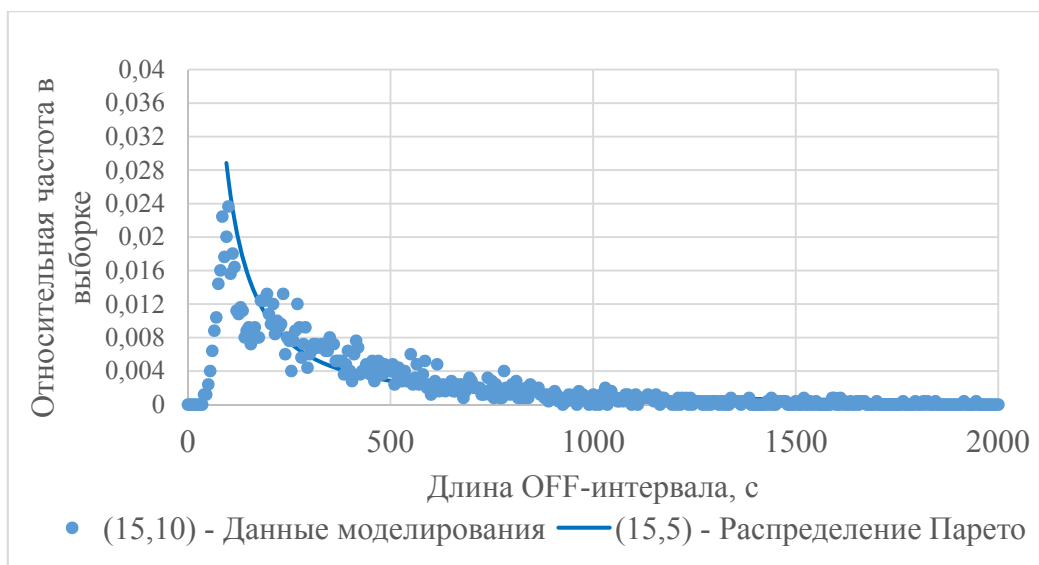


Рисунок 2 – Распределение длин OFF-интервалов (данные имитационного моделирования)

В третьей главе диссертационной работы описаны методы определения характеристик трафика и произведен анализ методов определения степени самоподобия и долговременной зависимости трафика сетей связи.

В том числе в третьей главе описано определение среднего числа пакетов, приходящих на сетевое устройство в секунду, среднеквадратического отклонения данной величины, определение функции распределения среднего

числа пакетов в секунду, а также рассмотрено несколько методов определения степени самоподобия и долговременной зависимости трафика: метод анализа нормированного размаха, метод Хигучи, метод анализа автокорреляционной функции, периодограммный анализ, общий, локальный и агрегированный методы Виттла и вейвлет-анализ.

В результате сравнения указанных выше характеристик и методов предложено использовать для дальнейшего анализа трафика в рамках комплексной модели анализа трафика на шлюзе беспроводной сенсорной сети следующие методы: определение средней интенсивности трафика на основе вычисления среднего числа пакетов, приходящих на шлюз БСС в секунду, а также определение степени самоподобия и долговременной зависимости трафика при помощи анализа нормированного размаха и локального метода Виттла.

Анализ нормированного размаха, предложенный Гарольдом Эдвином Хёрстом в 1961 году, использует для определения степени самоподобия и долговременной зависимости пропорциональность размаха значений функции для выборок разного размера (нормированного среднеквадратическими отклонениями тех же выборок) размеру выборки в степени H , где H – параметр Хёрста, то есть степень самоподобия и долговременной зависимости ряда:

$$M[(R/S)_i] \sim cn^H \text{ при } n \rightarrow \infty.$$

Значение параметра Хёрста определяется как угловой коэффициент линейной функции, аппроксимирующей вычисленную зависимость $M[(R/S)_i]$ от n , построенную в логарифмических осях (графический метод).

Локальный метод Виттла использует свойство затухания функции спектральной плотности сигнала на низких частотах в соответствии с показательным законом:

$$f(\nu) \sim G(H)|\nu|^{1-2H} \text{ при } \nu \rightarrow 0.$$

При этом используется оптимизационный метод: для нахождения параметра Хёрста необходимо минимизировать разницу между вычисленной спектральной плотностью $I(\nu)$ и ее аппроксимацией, приведенной выше.

Таким образом, предложенный комплексный метод оценки характеристик трафика включает в себя два метода определения степени самоподобия и долговременной зависимости, которые не только анализируют различные области представления трафика (временную и частотную), но и используют два различных метода вычисления параметра Хёрста – графический и оптимизационный.

Четвертая глава описывает созданную имитационную модель БСС слежения за целью, имеющей различные паттерны движения, и содержит результаты имитационного моделирования, в частности, зависимость характеристик трафика, поступающего на шлюз БСС слежения за целью, от различных параметров сценария работы БСС.

В данной главе, в частности, выявляется, что средняя длительность периодов отправки пакетов узлами БСС слежения за случайно движущейся целью влияет на степень самоподобия и долговременной зависимости агрегированного на шлюзе трафика в большей степени, чем форма распределения этой величины.

Также показывается, что по сравнению с известными результатами об увеличении интенсивности трафика при увеличении скорости передачи данных в течение ON-интервалов, это увеличение приводит и к существенному росту (до 60 %) степени самоподобия и долговременной зависимости агрегированного на шлюзе трафика (рис. 3).

Во второй части данной главы содержится комплекс рекомендаций, касающихся особенностей проектирования БСС слежения за целью, и призванный обратить внимание проектировщиков данных сетей на те аспекты работы БСС, которые важно учитывать с точки зрения обеспечения качества обслуживания в проектируемой сети.

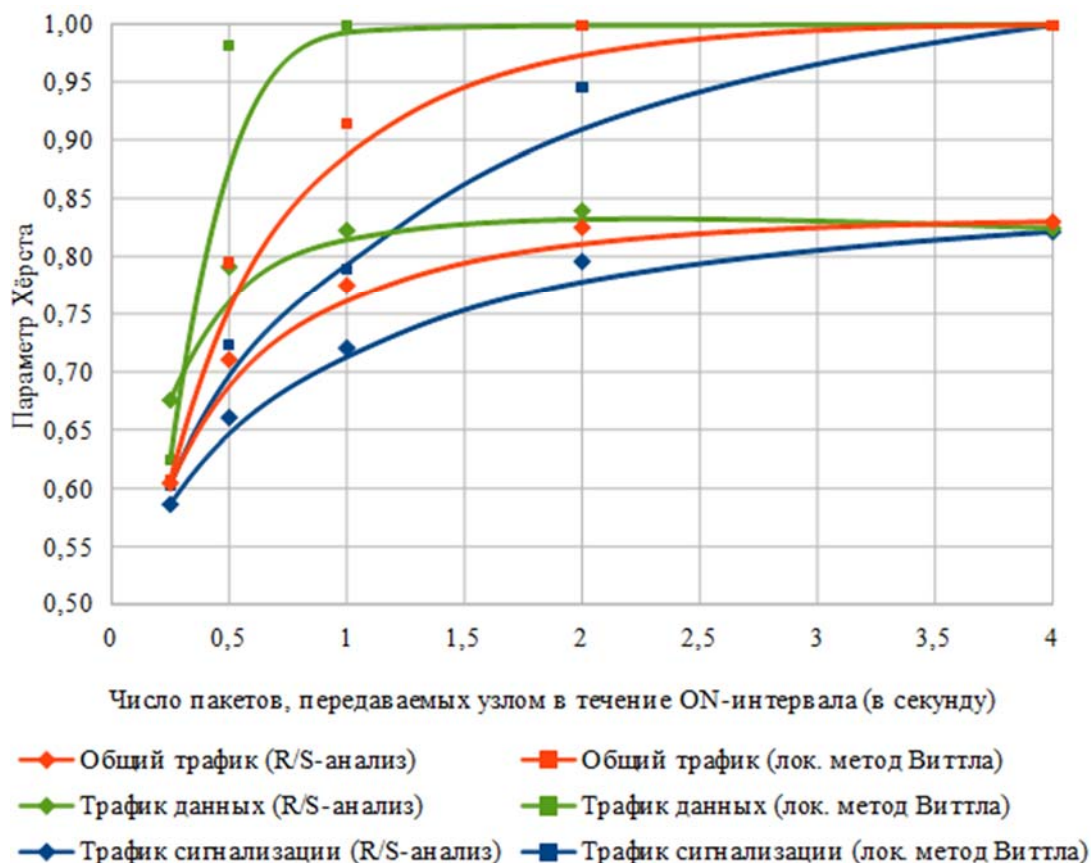


Рисунок 3 – Зависимость степени самоподобия трафика на шлюзе БСС от скорости передачи данных (числа пакетов в секунду) сенсорными узлами в течение ON-интервалов

Кроме того, четвертая глава содержит описание созданного на основании результатов моделирования метода генерации трафика, обладающего свойствами самоподобия и долговременной зависимости. Данный метод основан на агрегации потоков трафика от нескольких сенсорных узлов, которые в свою очередь передают данные в соответствии с ON-OFF моделью, причем длительности ON и OFF интервалов имеют распределение Парето. Нужная степень самоподобия трафика в описываемом методе может быть задана путем подбора скорости передачи данных каждым из сенсорных узлов в течение ON-интервалов.

Для примера в таблице Таблица 1 показано соотношение между числом пакетов, передаваемых каждым из сенсорных узлов в течение ON-интервалов, k и параметром Хёрста (мерой самоподобия и долговременной зависимости) для модели БСС, описанной в четвертой главе: 24 узла-источника, $ON_{cp} = 10$ секундам и $OFF_{cp} = 50$ секундам, параметр формы распределения Парето $\alpha = 1,6$ и размера пакета 48 байт (20 байт данных и 28 байт служебной информации).

Таблица 1 – Выбор числа передаваемых пакетов в секунду в зависимости от требуемого значения показателя Хёрста

Число передаваемых пакетов в секунду в течение ON-периодов (каждым из узлов)	Параметр Хёрста
0,25	0,68±0,04
0,5	0,79±0,06
1	0,82±0,03
2	0,84±0,02

В заключении приводится описание основных результатов диссертационной работы:

1. На основе анализа современного состояния развития беспроводных сенсорных сетей определены наиболее важные архитектурные особенности и наиболее широко применяемые и перспективные протоколы БСС.

2. На основе анализа разработанных к настоящему моменту моделей трафика с учетом применимости их для беспроводных сенсорных сетей выбрана модель трафика сенсорного узла БСС слежения за случайно движущейся целью.

3. Разработана аналитическая модель трафика сенсорного узла БСС с другим типом движения цели – линейным.

4. Создана имитационная модель трафика сенсорного узла БСС, предназначенной для слежения за линейно движущейся целью, подтверждающая корректность созданной аналитической модели. На основе данных моделирования предложено расширение аналитической модели в части характеристики распределения длительностей OFF-интервалов.

5. Проанализированы существующие методы определения характеристик трафика, в том числе анализ методов определения степени самоподобия и долговременной зависимости трафика сетей связи. На их основе предложена модель определения характеристик трафика на шлюзе БСС, использующий вычисление средней интенсивности трафика, а также степени его самоподобия методом анализа нормированного размаха и локальным методом Виттла.

6. Создана комплексная модель оценки характеристик трафика на шлюзе беспроводной сенсорной сети (отдельного кластера сети) слежения за целью и двух сценариев ее работы: для цели, движущейся случайным образом, или цели, движущейся линейно.

7. В результате анализа данных имитационного моделирования выяснено, что средняя длительность периодов отправки пакетов узлами БСС слежения за случайно движущейся целью влияет на степень самоподобия и долговременной зависимости агрегированного на шлюзе трафика в большей степени, чем форма распределения этой величины и средней длительности периодов, когда пакеты не отправляются. Также в результате анализа данных имитационного моделирования выяснено, что по сравнению с известными результатами об увеличении интенсивности трафика при увеличении скорости передачи данных в течение ON-интервала, это увеличение приводит и к существенному росту (до 60 %) степени самоподобия и долговременной зависимости агрегированного на шлюзе трафика.

8. На основании приведенных в предыдущем пункте результатов предложен метод генерации трафика с заданной степенью самоподобия и долговременной зависимости при помощи управления скоростью передачи пакетов группой узлов в течение ON-интервалов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выборнова, А. И. Модели беспроводных сенсорных сетей для различных применений / А. И. Выборнова // Электросвязь. – 2013. – № 1. – С. 24–27 (*из перечня ВАК*).

2. Выборнова, А. И. Модель источника трафика в беспроводных сенсорных сетях слежения за целью / А. И. Выборнова // Электросвязь. – 2014. – № 9. – С. 10–12 (*из перечня ВАК*).

3. Выборнова, А. И. Проблемы моделирования трафика в беспроводных сенсорных сетях / А. И. Выборнова // СПбНТОРЭС. 66-я Научно-техническая конференция, посвященная дню радио, 19–29 апреля 2011 г. Труды конференции. – 2011. – С. 195–196.

4. Выборнова, А. И. Исследование самоподобного трафика в сенсорных сетях / А. И. Выборнова // СПБНТОРЭС. 67-я Научно-техническая конференция, посвященная дню радио, 19–27 апреля 2012 г. Труды конференции. – 2012. – С. 117–118.

5. Vybornova, A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Medical and Tracking Applications / A. Vybornova, A. Koucheryavy // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. 12th International Conference, NEW2AN 2012 and 5th Conference ruSMART 2012 St. Petersburg, Russia, August 2012, Proceedings (LNCS 7469, Springer) – 2012. – PP. 338–346.

6. Vybornova, A. Traffic Analysis in Target Tracking Ubiquitous Sensor Networks / A. Vybornova, A. Koucheryavy // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. 14th International Conference, NEW2AN 2014 and 5th Conference ruSMART 2014 St. Petersburg, Russia, August 2014, Proceedings (LNCS 8638, Springer). – 2014. – PP. 389–398.

7. Выборнова, А. И. Моделирование источника трафика в беспроводной сенсорной сети слежения за целью / А. И. Выборнова // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании»: материалы конференции. – СПб. : СПбГУТ, 2014. – С. 225–229.

8. Выборнова, А. И. Методы определения степени самоподобия и долговременной зависимости трафика / А. И. Выборнова, А. Е. Кучерявый // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании»: материалы конференции. – СПб. : СПбГУТ, 2014. – С. 230–235.