

На правах рукописи



Дао Чонг Нгиа

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
Парамонов Александр Иванович

Официальные оппоненты: **Татарникова Татьяна Михайловна**,
доктор технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра
информационных систем, профессор кафедры

Сахарова Мария Александровна,
кандидат технических наук,
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научно-исследовательский отдел по разработке
систем связи, заместитель начальника отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-исследовательский
институт радио», Москва

Защита состоится 26 июня 2019 года в 16.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 219.004.04, созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 23 мая 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.004.04,
канд. техн. наук



М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. Развитие сетей связи в настоящее время и в долгосрочной перспективе происходит на основе концепции Интернета вещей. Концепция Интернета вещей основана на так называемых мультиагентных технологиях, которые позволяют соотносить реальный мир с виртуальным. Наиболее масштабным применением концепции Интернета Вещей являются беспроводные сенсорные сети. 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. Данные собираются во всех или некоторых узлах датчика и перенаправляются на центральную базовую станцию для дальнейшей обработки.

При этом, построение сетей с подвижными узлами предполагает использование технологий и протоколов, позволяющих организовать сеть в зоне связи всех ее узлов динамически изменять структуру сети в зависимости от изменения взаимного расположения узлов сети.

Наряду с распределением расстояний и длин кратчайших путей между узлами сети, существенное влияние на функционирование оказывает подвижность узлов. Если рассматривать подвижность узлов, в общем случае, то результаты такого исследования, возможно, будут иметь теоретическое значение, однако практические приложения, как правило, предполагают определенный порядок движения, определяемый конкретными задачами. Поэтому целесообразно рассматривать подвижность узлов в контексте решаемой задачи, с учетом особенностей их движения.

Кроме того, расширение зоны действия беспроводной самоорганизующейся сети за счет мобильных узлов, увеличение связности сети, повышение ее пропускной способности являются достаточно актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Характеристики трафика и протоколы маршрутизации всегда являлись важнейшими объектами исследований для любых сетей связи. В последние годы, достигнут существенный прогресс в области исследования беспроводных сенсорных сетей, опубликовано сравнительно небольшое число работ в силу становления этой области исследования. Среди работ отечественных и зарубежных авторов отметим труды А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, Р.В. Киричка, Е.А. Кучерявого, О.И. Шелухина, С.Н. Степанова, А.К. Erlang, A. Jensen, V.B. Iversen, P. Kuhn и многих других. Их работы позволили оценить возможности этих сетей по передаче трафика, найти новые подходы к архитектуре построения беспроводных сенсорных сетей, к решению проблем выполнения процессов изменений конфигурации сети, обусловленных характером взаимного движения узлов и другими изменениями условий распространения сигнала и абонентским трафиком. Это новое направление находится в состоянии постоянного развития.

В диссертации разрабатываются подходы к прогнозированию развития сетей связи в условиях относительного движения узлов, и оцениваются адекватные модели для каждого периода развития сети, формируются модели для распределенного в пространстве трафика и предлагаются методы оптимизации его обслуживания, исследуются модели трафика для справочно-информационных центров и сетей машина-машина M2M (Machine-to-Machine), разрабатываются методы его сглаживания и близкие к оптимальным решения по распределению ресурсов сети.

Цель работы и задачи исследования. Обеспечение функционирования сетей интернета вещей путем разработки модельно-методического аппарата для организации сетей и обслуживания трафика.

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

- анализ тенденций развития сетей связи;
- анализ концепций развития Интернета Вещей и Тактильного Интернета;
- анализ роли задач построения беспроводных сенсорных сетей в перспективных сетях связи;
- анализ маршрутов в сети, построенной в группе узлов;
- разработка метода организации сети связи в группе узлов;
- исследование особенностей трафика в современных сетях связи;
- разработка метода обслуживания M2M трафика в сети с подвижными объектами.
- анализ стабильности маршрутов в сети с подвижными узлами.
- разработка метода выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами.

Объект исследования. Свойства маршрутов и качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях.

Предмет исследования. Модели и методы организации сетей Интернета вещей и качества их функционирования.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания.

Научная новизна исследования. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанная модель отличается от известных моделей тем, что она позволяет описать длины маршрутов в сети, организованной в замкнутом пространстве, а метод дает возможность разделить узлы сети на кластеры на основании требований к длинам маршрутов.
2. Разработанная модель концентрации трафика M2M и его влияния на качество обслуживания в отличие от известных моделей учитывает трафик, производимый как устройствами Интернета вещей, так и другими пользователями, а также позволяет учитывать настойчивость устройств Интернета вещей.
3. Разработанный метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами позволяет производить поиск маршрута в сети с учетом данных о характере перемещения узлов, что дает возможность нахождения наиболее стабильного маршрута. Данный метод отличается от известных тем, что позволяет численно оценить вероятности существования маршрутов.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость работы: расширены классы моделей описания длин маршрутов и методов определения структуры сети. Расширен класс моделей трафика Интернета вещей, моделью, учитывающей особенности концентрации трафика и его совместного обслуживания с другими видами трафика. Расширен класс моделей описания структуры сети и методов поиска маршрутов.

Практическая ценность работы: аналитическая модель позволяет оценить длину маршрута в сети на основе данных о количестве узлов и геометрических размерах области

обслуживания, а также произвести кластеризацию узлов сети с целью ограничения длины маршрута. Данная модель позволяет оценивать устойчивость сети к перегрузкам, вызываемым концентрацией трафика, производимого устройствами Интернета вещей. Использование данного метода позволяет повысить эффективность маршрутизации трафика в сети с подвижными узлами за счет уменьшения частоты реконфигурации сети с подвижными узлами.

Результаты диссертационной работы использованы при чтении лекций и проведении практических занятий по курсу Интернет Вещей и самоорганизующиеся сети. Результаты использованы в двух рабочих программах, в разделах «Приложения самоорганизующихся сетей» и «Сети M2M». В указанных дисциплинах используются новые научные результаты, полученные в диссертационной работе: модель, описывающая свойства маршрутов и метод организации сети с помощью кластеризации ее узлов; модель концентрации трафика M2M и его влияния на качество обслуживания; метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами.

Основные положения, вносимые на защиту.

1. Модель, описывающая свойства маршрутов и метод организации сети с помощью кластеризации ее узлов.
2. Модель концентрации трафика M2M и его влияния на качество обслуживания.
3. Метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами.

Достоверность полученных автором научных и практических результатов определяется обоснованным выбором исходных данных при постановке частных задач исследования, основных допущений и ограничений, принятых в процессе математического моделирования, соответствием расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов исследований на международных, всероссийских и ведомственных научно-технических конференциях и конгрессах.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в учебном процессе кафедры Сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7th International Conference on Information Science and Application (Хошимин, 2016), 19-я международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016)» (Москва, 2016), 72-й и 73-й конференциях Санкт-Петербургского отделения Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова» (СПбНТОРЭС) (Санкт-Петербург, 2017, 2018), Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2017, 2018).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них: 2 в рецензируемых изданиях, 1 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 4 в других изданиях и материалах конференций.

Личный вклад автора. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Соответствие специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 12 и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и 2-х приложений. Общий объем работы – 153 страницах машинописного текста, из них основного текста 138 страниц. Работа содержит 45 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 101 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы диссертации, описаны основные проблемы и состояние исследуемой тематики, определены цель и задачи работы, представлены основные научные результаты, полученные в исследовании, сформулированы теоретическая и практическая ценность результатов, даны сведения об апробации работы и публикациях, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен анализ тенденций развития сетей связи, определена роль и задачи построения беспроводных сенсорных сетей (БСС). Приведены результаты анализа тенденций развития БСС и анализ основных стандартов и технологий которые служат основой для их построения.

Вторая глава диссертации посвящена анализу и поиску решения задачи выбора структуры сети беспроводной связи, на примере БСС, построенной в группе подвижных объектов. В данной главе построена модель маршрутизации трафика и разработан метод организации сети связи с подвижными узлами с применением методов кластеризации для выбора головного узла в группе.

Для характеристики связности узлов рассматриваемой сети использована вероятность попадания узла в сферу заданного радиуса R (радиуса связи узла) хотя бы одного соседнего узла. Которая при случайном размещении узлов равна

$$P_{\leq R} = 1 - e^{-a}, \quad (1)$$

где a – математическое ожидание количества узлов в сфере радиуса R .

$$a = V \cdot \rho, \quad (2)$$

где $V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3$ – объем сферы радиуса R ; ρ – плотность узлов (число узлов на кубический метр).

Для исследования длин маршрутов между узлами сети была выбрана область трехмерного пространства, ограниченная кубом со стороной 200 м. Предполагается, что зона связи узла представляет собой сферу, с радиусом 75 м. Узлы, расположенные в области пространства образуют пуассоновское поле.

В случае единичного куба выражение для функции распределения имеет вид

$$P(l) = \begin{cases} -l^2 \left[(l-8)l^2 + \pi(6l-4) \right] & 0 \leq l \leq 1 \\ 2l \left[\left(l^2 - 8\sqrt{l^2-1} + 3 \right) l^2 - 4\sqrt{l^2-1} + 12l^2 \sec^{-1} l + \pi(3-4l) - \frac{1}{2} \right] & 1 < l \leq \sqrt{2} \\ l \left[(1+l^2) \left(6\pi + 8\sqrt{l^2-2} - 5 - l^2 \right) - 16l \csc^{-1} \left(\sqrt{2-2l^{-2}} \right) + \right. \\ \left. + 16l \tan^{-1} \left(l\sqrt{l^2-2} \right) - 24(l^2+1) \tan^{-1} \left(\sqrt{l^2-2} \right) \right] & \sqrt{2} < l \leq \sqrt{3} \end{cases} \quad (3)$$

В случае единичного куба выражение для средней длины приводится к известному виду и его значение равно константе Роббинса $\Delta(3)$

$$\Delta(3) = \frac{1}{105} \left[4 + 17\sqrt{2} - 6\sqrt{3} + 21 \ln(1 + \sqrt{2}) + 42 \ln(2 + \sqrt{3}) - 7\pi \right] \approx 0,66170... \quad (4)$$

В виде (3) выражение функции распределения довольно сложно для практического применения. Для получения более простого описания распределения расстояний между узлами была построена имитационная модель и выполнено имитационное моделирование. Оценка среднего значения для полученных данных составила 131,3 м, что достаточно близко к теоретическому значению. На рисунке 1 также приведена аппроксимация полученных данных функцией плотности усеченного нормального распределения с тем же средним значением и среднеквадратическим отклонением 53 м

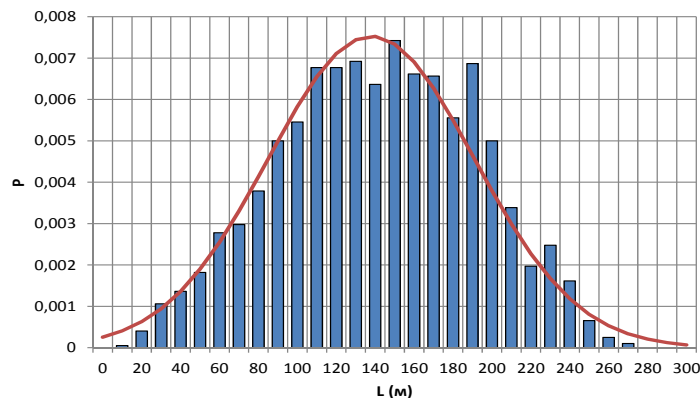


Рисунок 1 – Гистограмма распределения расстояний между 100 узлами сети в области, ограниченной кубом $500 \times 500 \times 500$ м и ее аппроксимация нормальным распределением

В результате экспериментов было получено, что распределение расстояний между узлами сети, ограниченной объемом куба с достаточной для некоторых приложений точностью можно описать усеченным нормальным распределением со средним значением, определяемым длиной стороны куба и константой Роббинса,

$$\bar{s} = a \cdot \Delta(3), \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\bar{s}}{1 + \Delta(3)} = a \frac{\Delta(3)}{1 + \Delta(3)} \approx 0,398 \cdot a, \quad (6)$$

где a – длина стороны куба, $\Delta(3)$ – константа Роббинса.

Формула (3) получена эмпирическим образом и описывает лишь приближенное значение для среднеквадратического отклонения.

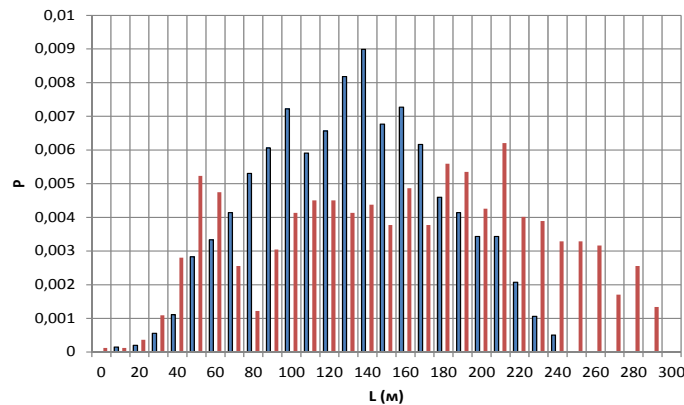


Рисунок 2 – Гистограммы распределения расстояний между 50 узлами сети в области, ограниченной кубом $500 \times 500 \times 500$ м и длин кратчайших путей между узлами (средняя длина кратчайшего пути 155,7 м)

На рисунках 1 и 2 показаны результаты анализа длин кратчайших путей для различного числа узлов сети: 50 и 100 узлов. Для поиска кратчайших путей использовался алгоритм Дейкстры.

Эмпирическое распределение длин кратчайших путей приближается к распределению расстояний между узлами сети с увеличением числа. При достаточно большом числе узлов сети, распределение длин кратчайших путей также с достаточной точностью может быть описано усеченным нормальным распределением.

Для выбора сетевой архитектуры и головного узла в группе объектов (на примере БПЛА), был использован алгоритмы кластеризации Forel. Для анализа его применения была разработана имитационная модель в Mathcad.

Рассмотрим пример, в котором используются 400 узлов сети, которые распределяются случайным образом на в некоторой области. Результаты приведены на рисунке 3.

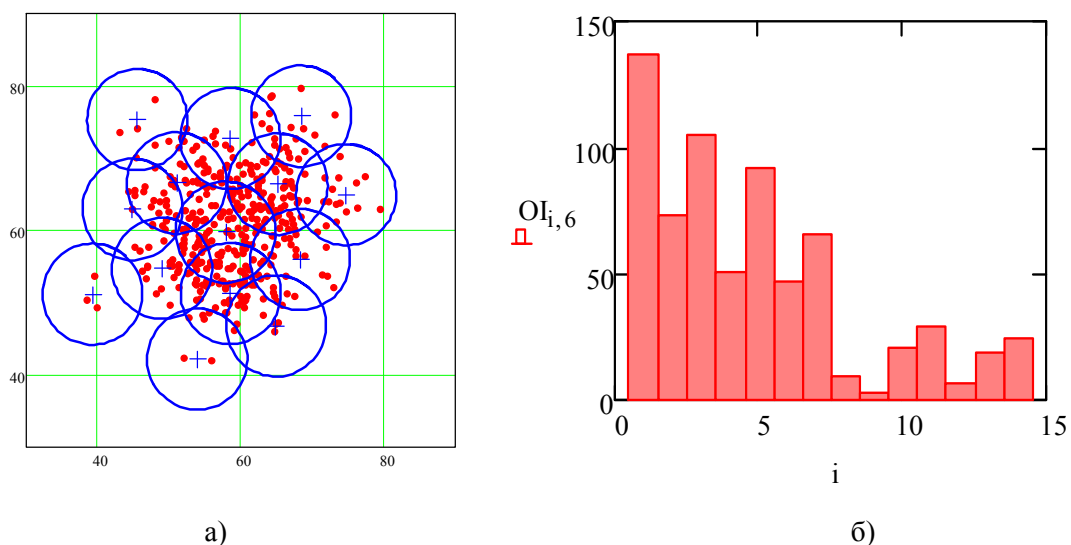


Рисунок 3 – Результаты кластеризации сети (а), плотность узлов в каждой группе (б)

Из рисунка 4 видно, что использование алгоритма *Forel* позволило выделить в исходном множестве узлов (БПЛА) 14 групп БПЛА с разными плотностями узлов. Используя данное решение могут быть выбраны головные узлы кластеров каждой из выделенных групп.

Для групп с малым количеством БПЛА, если они расположены рядом с центром управления, можно применить централизованную архитектуру. В этом случае, все БПЛА подключаются непосредственно к центру управления и все связи между БПЛА организуются маршрутами через наземную станцию.

Для групп с большим количеством БПЛА, если они расположены далеко от центра управления, можно применить децентрализованную архитектуру. В этой сети, выделяется головной БПЛА (головной узел кластера), который служит шлюзом *ad-hoc* сети. Через него передаются все данные между наземной станцией и другими БПЛА. Узлы, которые находятся в центре кластера, будут устанавливать связь с головным узлом и имеют возможность транзита трафика других узлов к центру управления по кратчайшему маршруту.

Результаты данной главы показывают, что использование алгоритма кластеризации *Forel* дает возможность выбирать близкий к оптимальному способ организации сети подвижных узлов (на примере БПЛА).

В третьей главе диссертационной работы проведен модели концентрации трафика M2M и его влияние на *QoS* в сетях *5G*.

Организацией 3GPP был опубликован документ 3GPP TR 37.868, в котором описан подход к моделированию трафика M2M в сети LTE. В отличие от большинства существующих моделей трафика, описывающих его как непрерывный во времени стационарный случайный процесс, предложено рассмотрение конечного интервала времени, трафик на котором производится всеми имеющимися M2M устройствами.

В данной главе разработана модель, учитывающая предложенные в данном документе свойства трафика, но применимая на неограниченном участке времени, разработанная модель также учитывает «настойчивость» устройств M2M.

Событиями, приводящими к массовой активации устройств могут быть различного рода отказы и аварии, масштабы которых таковы, что оказывают влияние на все устройства в зоне обслуживания. Интервал между событиями много больше интервала T_0 , $T_0 \ll 1/\lambda$. Согласно модели 3GPP, возможна реализация трафика двух типов: 1 и 2. Результаты, полученные имитационным моделированием в AnyLogic, приведена на рисунке 4.

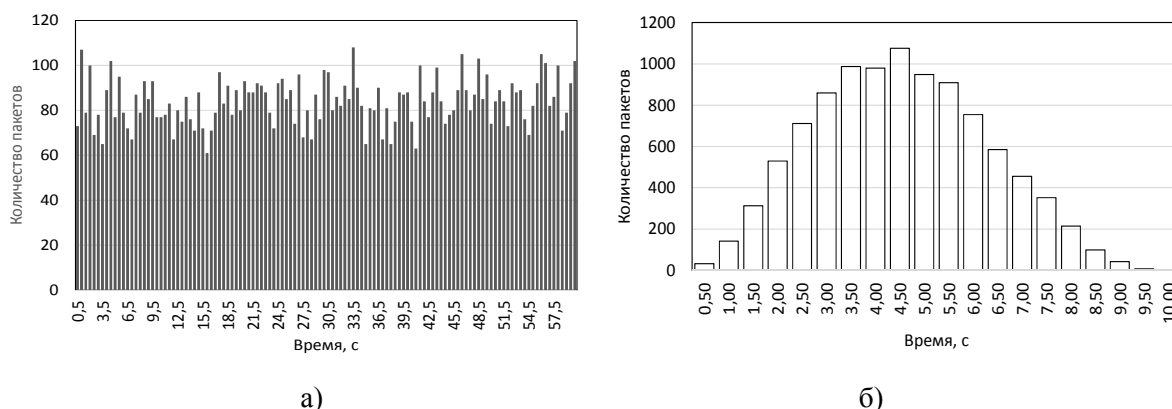


Рисунок 4 – Результаты имитационного моделирования трафика 1 и 2 типов

Для исследования влияния трафика M2M на качество обслуживания разработана модель агрегированного трафика. В модель трафика состоит из двух видов потоков: поток пользователей (H2H) и поток устройств M2M. Поток H2H представляет собой простейший поток. Поток M2M в «нормальном» режиме также представляет собой простейший поток с удельной интенсивностью 1/60 пакетов/с (согласно 3GPP).

На рисунке 5 приведена модель, учитывающая повторные передачи сообщений в случае коллизии или иной причины его потери.

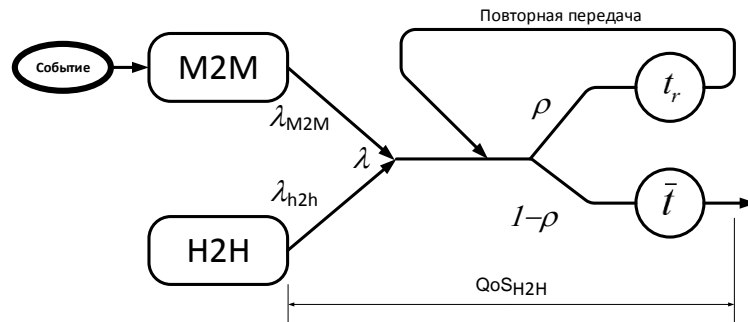


Рисунок 5 – Модель обслуживания агрегированного трафика при использовании общей среды распространения сигнала

На достаточно коротком интервале времени, в течении которого интенсивность потока можно считать постоянной, можно оценить вероятность свободного состояния канала как

$$p_{св} = 1 - \rho = 1 - E(\rho_{вх}, 1), \quad (7)$$

где ρ использование канала, которое может быть оценено с помощью первой формулы Эрланга как $\rho = E(a, 1) = \frac{\rho_{вх}}{1 + \rho_{вх}}$.

Вероятность доставки пакета с учетом многократной передачи (попыток передачи) можно записать как

$$p_{д} = 1 - p_{о}^k = 1 - \rho^k = 1 - \left(\frac{\rho_{вх}}{1 + \rho_{вх}} \right)^k, \quad (8)$$

где k – количество попыток передач пакета, $p_{о}$ – вероятность отказа (в данном случае вероятность занятости канала).

Из (8) можно получить оценку для k :

$$k = \frac{\ln(1 - p_{д})}{\ln \rho} = \frac{\ln(1 - p_{д})}{\ln \left(\frac{\rho_{вх}}{1 + \rho_{вх}} \right)}. \quad (9)$$

Зависимость числа попыток передач от интенсивности нагрузки (использования канала) ρ и вероятности доставки приведена на рисунке 6.

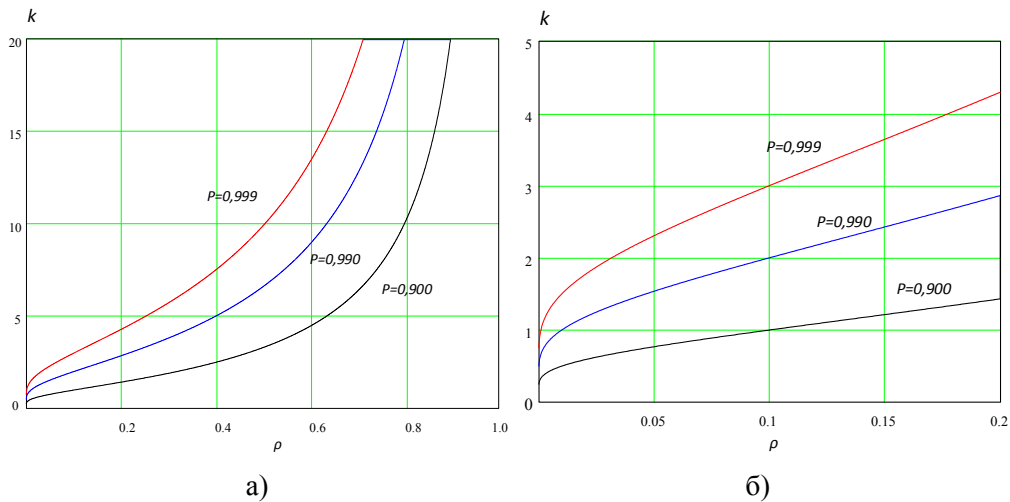


Рисунок 6 – Зависимость k от интенсивности нагрузки (а) и вероятности доставки (б)

Вероятность того, что для доставки пакета потребуется k попыток передачи определяется:

$$p_k = (1 - p_0) p_0^{k-1} = (1 - \rho) \rho^{k-1}. \quad (10)$$

Тогда среднее количество попыток передачи может быть получено как

$$k_m = \sum_{k=1}^{\infty} k p_k = \sum_{k=1}^{\infty} k (1 - \rho) \rho^{k-1}. \quad (11)$$

Как видно из рисунка б и выражения (11), при достаточно высокой вероятности доставки, в области относительно малого числа попыток передачи (до 5) использование канала не превышает 0,2. При большем использовании канала количество попыток резко возрастает.

Например, при использовании данной модели, и постоянной величине $t_r = 10$ с, реализация трафика выглядит, как представлено на рисунке 7.

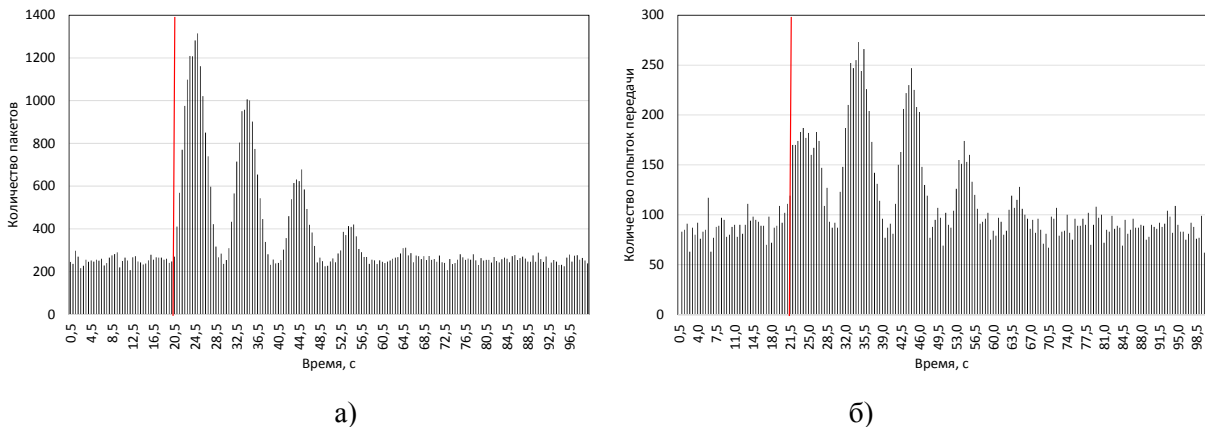


Рисунок 7 – Реализации потока агрегированного трафика в течение 100 с, при гарантированной доставке пакетов

Из рисунку 7а видно, что процесс передачи пакетов, инициированный в момент $t = 20$ с, повторяется несколько раз с периодом 10 с. На рисунке 7б приведено количество потерянных пакетов. Время доставки пакета от М2М устройства зависит от выбранного параметра задержки t_r и качества обслуживания трафика.

$$T = k(\rho)t_r. \quad (12)$$

В сети неуспех передачи пакета (кадра) может иметь место на любом из участков маршрута. С учетом этого выражение (9) для вероятности доставки может быть записано как:

$$p_{\text{д}} = 1 - p_{\text{о}}^k = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^L (1 - p_{\text{о}}^{(i)}) \right]^k, \quad (13)$$

где k – количество попыток передач пакета; $p_{\text{о}}^{(i)}$ – вероятность отказа на i -м участке маршрута, L – количество участков маршрута.

$$k_m = \sum_{k=1}^{\infty} k p_k = \sum_{k=1}^{\infty} k \prod_{i=1}^L (1 - p_{\text{о}}^{(i)}) \left[1 - \prod_{i=1}^L (1 - p_{\text{о}}^{(i)}) \right]^{k-1}. \quad (14)$$

Предположим, что маршрут содержит три составляющие (сеть доступа, ядро сети, сервер услуги).

Среднее время доставки пакета от M2M устройства с учетом (14) может быть определено как:

$$\bar{T} = k_m t_r. \quad (15)$$

Таким образом, применение модели агрегированного трафика позволяет учесть его изменение под влиянием некоторого события, приводящего к массовой активации устройств, и оценить качество обслуживания M2M устройств и фоновое (H2H) трафика, а также оценить возможные его колебания.

В четвертой главе диссертации разработан метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами. Для это в работе построена модель маршрута, в сети описанной графом. Маршрут между узлами s и t как рассматривается совокупность из $n - 1$ участков, где n – общее количество узлов в маршруте, включая узлы s и t (рисунок 8). Каждый из участков между узлами i и j характеризуется расстоянием между ними d_{ij} . Если это расстояние превышает величину R , то связность между узлами i и j нарушается, при этом весь маршрут перестает функционировать. Таким образом, для нарушения связности достаточно, чтобы расстояние между любой парой смежных узлов маршрута превысило величину R .

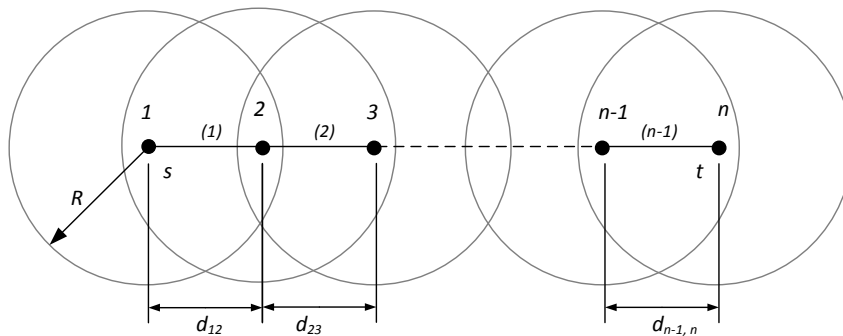


Рисунок 8 – Модель маршрута из n узлов

Перемещение транзитного узла ведет к изменению расстояний сразу между двумя смежными узлами, следовательно, вероятность потери связности на смежных участках, в общем случае, зависимы. Однако, для упрощения задачи, будем полагать, что вероятности связности на $n - 1$ участках маршрута p_{ij} независимы и будем рассматривать каждый из

участков как независимую смежную пару узлов (вершин). Вероятность потери связности маршрута, при наличии в нем n узлов можно определить как

$$q = 1 - \prod_{r=1}^{n-1} (1 - q_r), \quad (16)$$

где $q_i = 1 - p_i$ – вероятность потери связности на r -м участке.

Рассмотрим далее модель связности двух смежных вершин маршрута, рисунок 9. Будем полагать, что система координат движется вместе с рассматриваемой группой объектов, а ее движение определяется векторной суммой движений каждого из объектов группы, т.е. со скоростью и в направлении движения группы. Это движение таково, что начальные координаты узлов в данной системе можно считать неподвижными. Также допустим, что каждая из вершин может перемещаться относительно своих начальных координат случайным образом, опишем это перемещение величиной смещения по каждой из координат Δx и Δy (для двумерной модели). Далее будем полагать, что Δx и Δy случайные числа, подчиненные нормальному распределению с математическим ожиданием 0 и стандартными отклонениями σ_x и σ_y , соответственно.

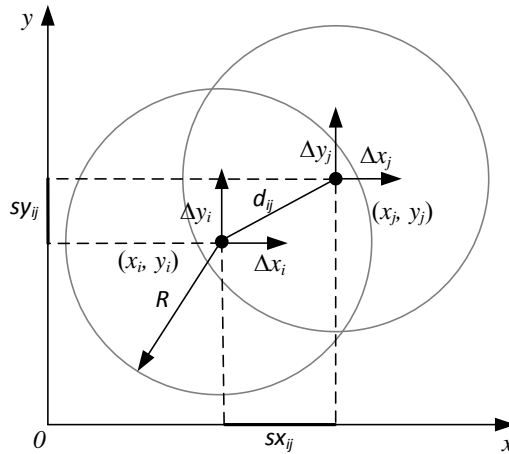


Рисунок 9 – Модель связности смежных узлов маршрута

Расстояние между начальными точками расположения узлов i и j в декартовой системе координат может быть определено как

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (17)$$

Расстояние между узлами, с учетом случайных перемещений узлов i и j может быть выражено как

$$\tilde{d}_{ij} = \sqrt{(x_i + \Delta x_i - x_j - \Delta x_j)^2 + (y_i + \Delta y_i - y_j - \Delta y_j)^2} = \sqrt{sx^2 + sy^2}. \quad (18)$$

Где проекции на оси x и y $sx = x_i + \Delta x_i - x_j - \Delta x_j$ и $sy = y_i + \Delta y_i - y_j - \Delta y_j$ являются случайными числами, подчиненными нормальному распределению с математическими ожиданиями $\mu_{x_{ij}} = x_i - x_j$, $\mu_{y_{ij}} = y_i - y_j$ и дисперсиями $\sigma_{x_{ij}}^2 = 2\sigma_x^2$, $\sigma_{y_{ij}}^2 = 2\sigma_y^2$, соответственно. В общем случае, если в выражении (18) под знаком квадратного корня кроме величин sx и sy имеются и другие случайные величины, подчиненные нормальному распределению с математическими ожиданиями $\mu_{x_{ij}}$, $\mu_{y_{ij}}$ и дисперсиями $\sigma_{x_{ij}}^2 = \sigma_{y_{ij}}^2 = \sigma_{ij}^2$ то величина \tilde{d}_{ij} имеет распределение n -мерного случайного вектора с плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \sigma^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{n-1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0, \quad (19)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма функция; n – количество случайных величин.

Функция распределения вероятности:

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{x^2}{n\sigma^2}, \frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} = I\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}, \frac{n}{2}\right), \quad x > 0, \quad (20)$$

где $I(a,b) = \Gamma(a,b)/\Gamma(b)$ – отношение неполной гамма функции.

В данном случае, при $n=2$ и не нулевых математических ожиданиях распределение принимает вид распределения Райса [45] с плотностью вероятности:

$$f(x)_{n=2} = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), \quad v = \sqrt{sx^2 + sy^2}, \quad x > 0, \quad (21)$$

где $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. (При нулевых математических ожиданиях распределение Релея, при $n=3$ распределение Максвелла).

Функция распределения Райса:

$$F(x) = 1 - Q_1\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{x}{\sigma}\right), \quad x > 0, \quad (22)$$

где Q_1 — Q – функция Маркума (Marcum Q-function [74])

$$Q_M(a,b) = 1 - e^{-\frac{a^2}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{2}\right)^k \frac{P\left(M+k, \frac{b^2}{2}\right)}{k!}. \quad (23)$$

На рисунке 10 приведены эмпирические гистограммы, полученные при имитационном моделировании и ее описание их плотностью вероятности и функцией распределения Райса.

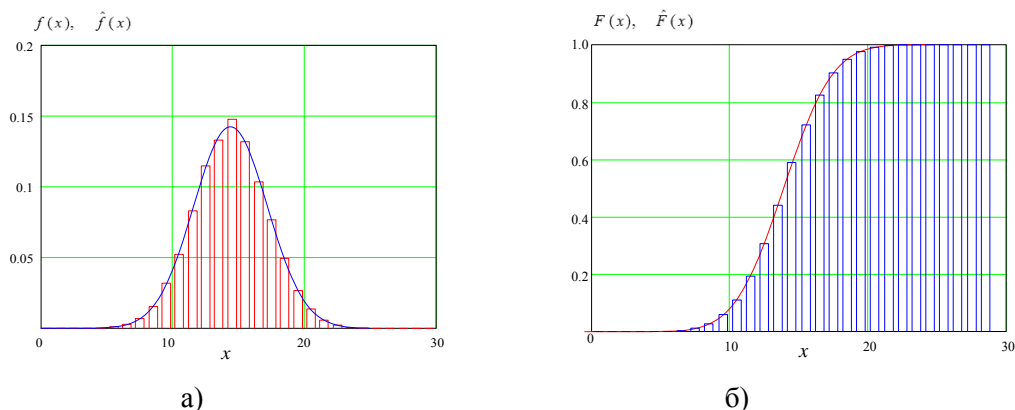


Рисунок 10 – Плотность вероятности (а) и функция распределения (б) расстояния между узлами

Вероятность потери связности на участке между двумя узлами можно оценить, как вероятность того, что расстояние между ними не превысит величину R , которая с учетом (23) будет определяться как:

$$p_{ij} = p(d_{ij} < R) = F(R) = 1 - Q_1\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{R}{\sigma}\right), \quad (24)$$

где $v = \sqrt{sx^2 + sy^2}$. Вероятность нарушения связности на участке $q_{ij} = 1 - p_{ij}$.

Таким образом, с согласно (1), с учетом (24) может быть определена вероятность связности (нарушения связности) всего маршрута, т.е. метрика, характеризующая его стабильность.

Приближенная оценка. Для вычисление выражения (24) требуется вычисление функции Маркума (23), что может вызвать сложности при ограниченных вычислительных ресурсах. Рассмотрим возможность аппроксимации функции распределения более S-кривой:

$$\tilde{F}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-v}{\sigma/2}}}. \quad (25)$$

На рисунке 11 приведены кривые $F(x)$ и $\tilde{F}(x)$ полученные согласно выражениям (24) и (25) соответственно, а также относительная ошибка аппроксимации, полученная как:

$$\delta(x) = \frac{|F(x) - \tilde{F}(x)|}{F(x)}. \quad (26)$$

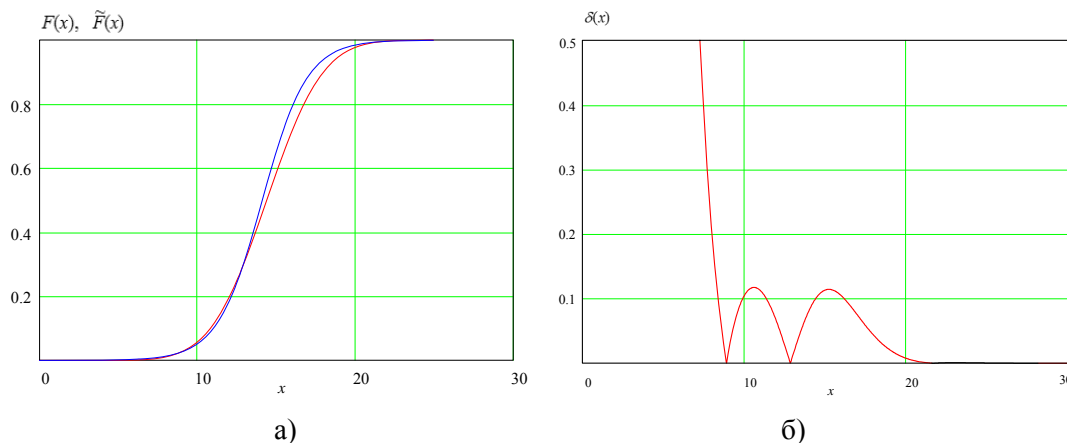


Рисунок 11 – Аппроксимация функции распределения (а) и относительная ошибка (б)

Как видно из рисунка 11 аппроксимация $F(x)$ S-кривой (25) дает приемлемую ошибку в области относительно больших значений вероятности. В точке $x = 0$ значение S – функции больше нуля, в то время как $F(x) = 0$, очевидно, что при этом величина относительной ошибки в нуле стремится к бесконечности, ошибка также велика в области значений вероятности более 0,03 (приблизительно). При значениях $F(x) > 0,03$ относительная ошибка не превышает 12 %. Как правило, рабочая область значений существенно превышает эту величину, поэтому данная аппроксимация может найти практическое применение в задачах реализации поиска стабильных маршрутов.

Следующей задачей является определение метода поиска маршрута с использованием данной метрики. На основе предшествующего анализа, можно заключить, что задача выбора маршрута состоит в поиске среди множества возможных маршрутов Ω , маршрута (маршрутов) с максимальной вероятностью связности $p = 1 - q$, где q – вероятность нарушения связности, определяемая согласно (16).

$$\max_{\Omega}(p) = \min_{\Omega}(q). \quad (27)$$

При описании сети моделью взвешенного графа, данную задачу можно свести к задаче поиска кратчайшего пути в графе, выбрав в качестве весовых коэффициентов ребер (или дуг) логарифмы вероятности их связности:

$$c_{ij} = -\lg p_{ij}, \quad (28)$$

где величина p_{ij} определяется согласно (24).

Тогда поиск кратчайшего пути решает задачу минимизации суммы весовых коэффициентов ребер:

$$\min_{\Omega} \left(\sum_{i=1}^n c_{ij} \right). \quad (29)$$

Для решения задачи (29) может быть использован любой известный алгоритм поиска кратчайшего пути в графе.

Предлагаемый метод поиска наиболее стабильного маршрута содержит следующие шаги.

1. Формирование исходных данных. На данном этапе формируется:

– матрица начальных координат узлов сети $Q = \{(x_i, y_i)\}$, $i = 1..m$, где m – количество узлов в сети. Целесообразно в качестве начала координат выбрать один из узлов сети;

– для каждого из узлов задается степень его подвижности относительно начальных координат с помощью стандартного отклонения σ , т.е. определяется матрица $\zeta = \{\sigma_i\}$, $i = 1..m$;

– задается радиус связи узла R .

2. Вычисление вероятностей связности $P = \{p_{ij}\}$, $i, j = 1..m$.

$p_{ij} = F(d_{ij})$ для данного значения R и стандартного отклонения равного $\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$, где $F(x)$ – определяется на основе (24) или с помощью приближенной модели (25), где d_{ij} – расстояние между узлами, определяемое согласно (17).

3. Формирование матрицы весов. На основе матрицы вероятностей связности P вычисляется матрица весовых коэффициентов ребер $C = \{c_{ij}\}$, $i, j = 1..m$, где

$$c_{ij} = \begin{cases} -\lg(p_{ij}) & d_{ij} < R, \\ 0 & d_{ij} \geq R. \end{cases}$$

Данная матрица является исходной для следующего этапа.

4. Поиск кратчайшего пути (путей). Для решения задачи может быть использован любой алгоритм поиска кратчайшего пути.

Конец. Решение найдено.

На рисунке 12 приведены примеры результатов имитационного моделирования и использования приведенного выше метода для поиска наиболее «стабильного» маршрута в сети из 100 узлов, расположенных в квадрате 200x200 м случайным образом, при радиусе связи узла $R = 50$ м. Поиск путей кратчайших путей (этап 4) производился алгоритмом Флойда.

На рисунке 12а приведен кратчайший маршрут, найденный по критерию минимальной суммарной длины пути, на рисунке 12б приведен путь, найденный по критерию максимальной стабильности (27), при значении стандартного отклонения $\sigma = 5$ м.

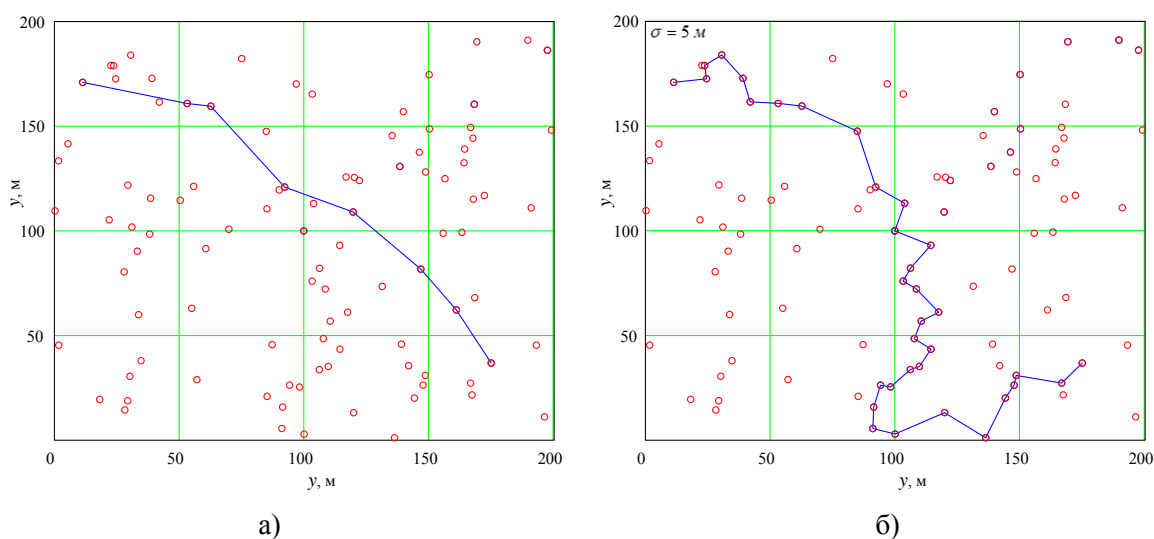


Рисунок 12 – Примеры выбора маршрутов

При увеличении стандартного отклонения случайных отклонений узлов от их начального положения в пути, найденном по критерию максимальной стабильности увеличивается количество транзитных участков. Это объясняется тем, что алгоритм поиска «стабильного» пути отдает предпочтение «коротким» участкам, так как они обеспечивают большую вероятность связности, чем «длинные» участки. Данный результат вполне ожидаем. Однако при дальнейшем увеличении стандартного отклонения, после достижения им некоторого значения, происходит обратный процесс, для значений стандартного отклонения $\sigma = 10$ м и $\sigma = 50$ м, соответственно. Этот результат не вполне очевиден, хотя также вполне объясним тем, что при больших значениях дисперсии (когда стандартное отклонение имеет величину близкую к радиусу связи узла) надежность участков настолько мала, что при оценке стабильности всего маршрута доминирует их количество.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбор маршрута по критерию стабильности (27) имеет смысл, когда подвижность узлов сети, относительно их начальных положений относительно невелика, т.е. стандартное отклонение их позиций не превышает радиуса связи узла. В противном случае результат поиска будет близок к результату поиска маршрута по критерию минимального количества транзитов. Так как данные условия характерны для большинства приложений, как это было отмечено во введении, данный алгоритм может быть полезен при организации сети в группе подвижных объектов.

Стоит отметить, что данный метод включает в себя три основных элемента: модель маршрута, правила формирования исходных данных и метод поиска пути (путей). Все эти элементы, в общем, независимы. В данной работе описана модель, позволяющая выразить «стабильность» маршрута (вероятность связности маршрута) через параметры сети, и способ формирования исходных данных для задачи поиска пути. При использовании иных моделей данный подход может быть использован, например, для выбора наименее загруженного маршрута, маршрута с наименьшими потерями, определить иной критерий стабильности и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработан модельно-методический аппарата для организации и обслуживания трафика в беспроводных сенсорных сетях. Для достижения этой цели в работе последовательно решен ряд следующих задач.

1. Выполнен анализ тенденций развития сетей связи. Результаты которого позволили определить основные направления развития сетей связи, выделить наиболее перспективные из них и оценить актуальность решаемых в работе задач.

2. Среди выделенных перспективных направлений выбраны направления развития Интернета Вещей и Тактильного Интернета. На основе статистического анализа основных тенденций установлено, что данные направления будут актуальны в обозримой перспективе развития сетей связи.

3. Проведен анализ роли и задач построения беспроводных сенсорных сетей в перспективных сетях связи. Результаты анализа показали, что беспроводные сенсорные сети в перспективных сетях связи могут быть являются одной и составляющих, позволяющей решать задачи в рамках развития Интернета вещей и тактильного Интернета.

4. Выполнен анализ маршрутов в сети, построенной в группе узлов. Результаты анализа позволили оценить свойства маршрутов сети с целью выбора метода маршрутизации трафика и выбора структуры сети.

5. Разработан метод организации сети связи в группе узлов с на основе метода кластеризации, который обеспечивает выбор структуры сети с учетом свойств маршрутов.

6. Исследованы особенности трафика в современных сетях связи, которые позволили оценить специфику трафика M2M, производимого автоматическими устройствами.

7. Разработка метода обслуживания M2M трафика в сети с подвижными объектами. Разработанный метод учитывает особенности («настойчивость») источников трафика.

8. Проведен анализ сети с подвижными узлами с точки зрения стабильности маршрутов. Разработана модель, позволяющая оценить стабильность маршрутов на основе данных о характере взаимных перемещений узлов сети.

9. Разработан метода выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами. Разработанный метод позволяет производить выбор маршрута с учетом его стабильности, что обеспечивает повышение качеств функционирования сети.

Полученные в работе результаты могут быть использованы в при моделировании и построении беспроводных сенсорных сетей, в том числе и сетей с подвижными узлами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях

1. Дао, Ч.Н. Модели концентрации трафика M2M и оценка его влияния на QoS в сетях 5G / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // Электросвязь. — 2018. — № 4. — С. 47–54.

2. Дао, Ч.Н. Метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // Электросвязь. — 2018. — № 8. — С. 37–44.

**Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых
в международных базах данных**

3. Dao, N. Influence of Intentional Electromagnetic Interference on the functioning of the Terrestrial Segment of Flying Ubiquitous Sensor Network / N. Dao, A. Koucheryavy, A. Paramonov // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. — 2016. — Vol. 376. — P. 92–100.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях
и материалах научных конференций**

4. Дао, Ч.Н. Анализ структуры сетей связи на базе беспилотных летательных аппаратов / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016) материалы Девятнадцатой международной научной конференции: в 3 томах / Под общ. ред. В.М. Вишневого и К.Е. Самуйлова*. — 2016. — С. 92–100.

5. Дао, Ч.Н. Применение методов кластеризации для выбора головного узла в группе БПЛА / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // *72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио*. — СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). — 2017. — С. 197–199.

6. Дао, Ч.Н. Методы организации сети связи на базе БПЛА / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст.* — 2017. — С. 245–249.

7. Дао, Ч.Н. Моделирование экстремального трафика Машина–Машина / Ч.Н. Дао, А.И. Парамонов // *73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио*. — СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). — 2018. — С. 245–246.