

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»
СПб ГУТ)))

На правах рукописи



Нуриллов Илхом Нусратуллович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗНОСТИ
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре сетей связи и передачи данных (СС и ПД) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ).

Научный руководитель: **Парамонов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Официальные оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий "Санкт-Петербургский государственный экономический университет" (СПбГЭУ).
Ермолаев Сергей Юрьевич
кандидат технических наук, руководитель группы технической поддержки ООО НПК "Маджента девелопмент", г. Самара.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН), г. Москва

Защита состоится « 21 » ноября 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ) по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, д.23, конференц-зал корпуса №1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ):
https://www.psuti.ru/ru/science/dissertation_councils/announcements

Автореферат разослан « ____ » октября. 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.003.02
доктор технических наук, профессор

Тяжев Анатолий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются одной из основных компонент концепции Интернета Вещей и во многом определяют трафик будущих сетей связи пятого поколения 5G. На сегодняшний день БСС интенсивно развиваются благодаря относительно низкой стоимости, скорости развертывания и возможности применения в условиях, когда затруднительно использовать кабельные сети. Технологии БСС проникают в различные сферы жизнедеятельности человека, такие как медицина, наука, системы безопасности, сельское хозяйство, робототехника, промышленность, военное дело и многое другое.

Как и во всех сетях связи в БСС важнейшей задачей является обеспечение качества функционирования сети. Одним из основных показателей качества функционирования сети является связность. Под связностью в БСС, как правило, понимается вероятность обеспечения связи между произвольным сенсорным узлом с другими узлами. Связность между двумя узлами зависит от различных факторов, например, таких как: радиус связи узлов, направленность антенн, взаимное расположение узлов сети. Следует отметить, что вероятность связности выражает потенциальную (физическую) возможность доставки данных. Однако, наличие такой возможности является необходимым, но не достаточным условием для успешной доставки данных. Фактически возможность (вероятность) доставки данных зависит от качества каждого из каналов на каждом из участков маршрута. Невозможность доставки может быть вызвана перегрузками сети трафиком, потерями пакетов в канале, как из-за сторонних помех, так и из-за интерференции между узлами сети.

Низкая вероятность связности в БСС приводит к частичному или полному нарушению его работоспособности. Для обеспечения и полного восстановления функционирования в первую очередь, необходимо оценить вероятность связности БСС. Повышение связности БСС, как правило, сопряжено с необходимостью изменения конфигурации сети (путем добавления дополнительных узлов или изменения их расположения и иных параметров). Также для определения возможностей реализации тех или иных услуг на базе БСС важно иметь возможность потенциальной оценки сети с учетом связности и параметров ее функционирования.

С учетом вышеизложенного, можно сказать что тема диссертации является актуальной и направлена на решение задач построения БСС.

Степень разработанности темы. Параметры качества функционирования всегда являлись важнейшими объектами исследований для любых сетей связи. Среди российских и зарубежных исследователей в области БСС известны труды таких ученых как А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, Е.А. Кучерявого, Р.В. Киричка, А.В. Прокопьева, Л.Б. Бузюкова, Д.В. Окуневой, I.F. Akyildiz, W. Heinzelman, V. Khelifa, P. Varshney.

В этих работах рассмотрены и решены многие проблемы БСС, такие как увеличение времени жизненного цикла, кластеризация, маршрутизация, покрытия. В работах Л.Б. Бузюкова и Д.В. Окуневой рассмотрены вопросы построения БСС при различных законах распределения пользователей в двумерных областях обслуживания, также частично рассмотрены и вопросы анализа связности для таких случаев. Однако, задачи оценки и обеспечения связности в трехмерных областях до настоящего времени не являются полностью решенными. Лишь в работах Кранкиса и Крона предлагается использования направленных антенн и кооперативной передачи для увеличения связности. Вопросы математической оценки вероятности связности, и увеличения связности путем добавления

дополнительных узлов в трехмерной области обслуживания, согласно определенного алгоритма не были исследованы, до настоящей времени. Также не была исследована зависимость качества обслуживания от вероятности связности БСС.

Цель работы и задачи исследования. Цель работы состоит в обеспечении необходимой связности и полноты оценок качества функционирования беспроводных сенсорных сетей путем разработки модельно-методического аппарата.

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

- Анализ тенденций развития и области применения БСС
- Анализ задач построения БСС
- Анализ методов обеспечения связности в беспроводных гетерогенных сетях связи
- Разработка математической модели связности БСС
- Разработка методов обеспечения связности сети
- Исследование показателей качества функционирования БСС

Предмет исследования. Модели и методы оценки и обеспечения связности и качества функционирования беспроводных сенсорных сетей.

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

Научная новизна. Основными новыми научными результатами являются следующие:

- Разработана модель, описывающая вероятность связности беспроводной сенсорной сети, размещенной в трехмерном пространстве отличающаяся от известных моделей тем, что для нее определены ошибка оценки связности и условия применимости.

- Разработан метод обеспечения и восстановления связности беспроводной сенсорной сети в трехмерном пространстве путем введения близкого к оптимальному количества дополнительных узлов с учетом значимости узлов, который в отличие от известных методов, позволяет выбрать близкую к оптимальной локализацию дополнительных узлов с учетом их значимости при ограниченном ресурсе сети.

- Впервые предложена модель эффективной связности, позволяющая численно оценить возможность доставки данных в беспроводной сенсорной сети, отличающаяся от известных моделей тем, что она учитывает, как вероятность связности, так и качество обслуживания трафика.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит, прежде всего, в разработке нового метода оценка вероятность связности БСС и нового метода восстановления и обеспечения связности с использованием БПЛА. Кроме того, введен новый показатель качества функционирования, который позволяет оценивать возможность сети для предоставления тех или иных услуг.

Практическая значимость диссертационной работы состоит, в создании научно-обоснованных рекомендаций для оценки вероятность связности БСС, а также алгоритм, который позволяет эффективно добавляет дополнительные узлы для восстановления и обеспечения связности БСС.

Кроме того, предложен новый метод, по которому можно заранее определять возможность реализации тех или иных услуг связи поверх рассматриваемой беспроводной самоорганизующийся сети. При этом учитываются особенности технологии узлов сети.

Результаты диссертационной работы используются в кафедре ССиПД СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории графов, математического анализа, теории вероятностей, имитационного моделирования.

Для построения аналитических моделей численного анализа использовался программный математический пакет Mathcad 15 и MS Excel. Имитационное моделирование выполнялось с помощью симулятора OMNeT++.

Тематика и область диссертации. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 12 «Разработка методов эффективного использования сетей, систем, устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования в различных отраслях народного хозяйства» и п. 14 «Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель, описывающая вероятность связности беспроводной сенсорной сети, размещенной в трехмерном пространстве и определение области ее применения.
2. Метод обеспечения и восстановления связности беспроводной сенсорной сети путем добавления близкого к оптимальному количества узлов, с учетом значимости узлов.
3. Модель эффективной связности беспроводной сенсорной сети, позволяющая численно оценить возможность доставки данных с учетом вероятности связности и качества обслуживания трафика.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования и представлением основных результатов в публикациях и на выступлениях как на российских, так и на Международных конференциях:

The 15th International Conference NEW2AN/ruSMART 2016-17 (сентябрь/2016, август/2017), Internet of Things and its Enablers (INTHITEN) (декабрь 2016), на 71-й, 72-й, 73-й научно-технических конференциях посвященных Дню радио (апрель 2016, апрель 2017, апрель 2018 соответственно),

Публикации. Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в отраслевых журналах, сборниках трудов конференций. Всего опубликовано 10 работ, из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 2 статьи в зарубежном научно-техническом сборнике (Scopus), и 6 статей в журналах, включенных в РИНЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает содержание, введение, четыре главы, библиографический список из 112 наименований, четыре приложения. Текст работы содержит 140 страниц (без учета приложений) и 43 рисунка.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Краткое содержание работы

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

В первой главе диссертации приведены результаты анализа задач построения беспроводных сенсорных сетей. Также приведены результаты анализа тенденций развития БСС и области их применения. Выполнен анализ основных стандартов и технологий которые служат основой для построения всепроникающих сенсорных сетей.

Вторая глава диссертации посвящена анализу вопросов эволюции представлений о связности в сетях связи на протяжении всей истории их развития. Основное внимание уделено современному этапу развития сетей связи, в частности самоорганизующимся сетям. Появления новых сетей и реализация новых услуг изменяет представления о связности в сетях связи и требования к ней. Делается вывод о необходимости разработки новых методов обеспечения связности в самоорганизующихся сетях.

Приведены результаты анализа особенностей построения гетерогенных сетей связи. В частности, значение связности и методов ее обеспечения в гетерогенных сетях. Фрагмент гетерогенной сети (рисунок 1), где сенсорная сеть взаимодействует с терминалами сетей 2G, 3G, 4G и Wi-Fi.

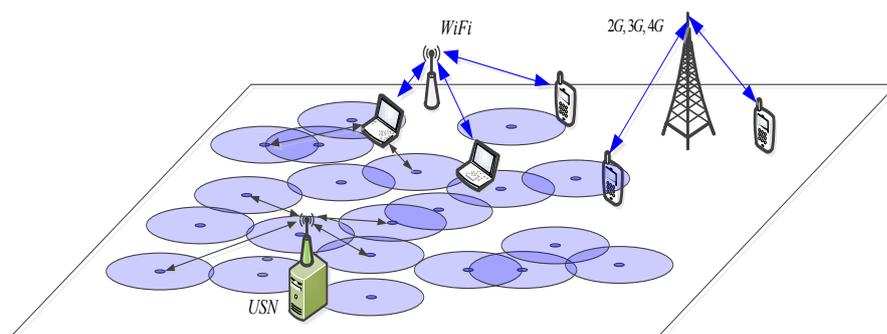


Рисунок 1 - Гетерогенная сеть

На рисунке 2 видно, что связность нескольких сенсорных узлов обеспечиваются несколькими способами. Первый, когда терминалы сетей Wi-Fi и 2G, 3G, 4G связывают два и более сенсорных узлов. Второй способ, когда узел связывается со шлюзом USN через сети 2G, 3G, 4G и Wi-Fi посредством терминалов этих сетей.

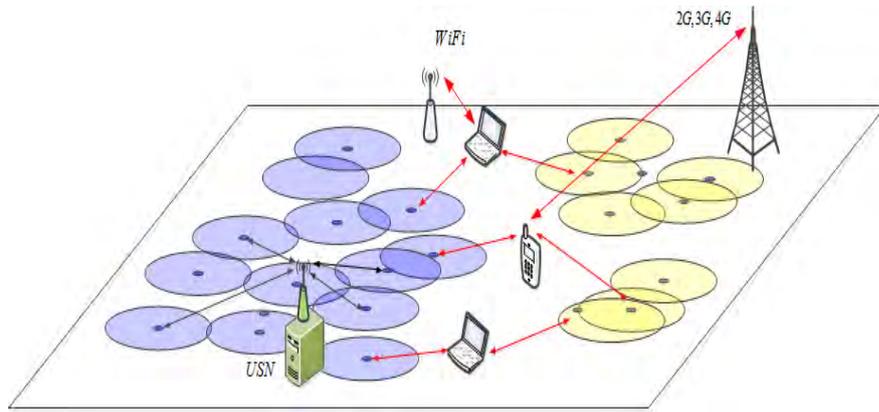


Рисунок 2 - Повышение связности при взаимодействии узлов разных сетей.

Исходя из рассмотренного выше, можно построить модель связности (1). В гетерогенной сети на связность, т.е. вероятность доступности, влияет площадь зоны обслуживания сенсорной сети, плотность размещения узлов, радиус связи узла и плотность терминалов других сетей, которые поддерживают технологию WSN:

$$P=f(S, r_{USN}, r_{2G}, r_{3G}, r_{4G}, \dots) \quad (1)$$

где S – площадь зоны обслуживания сенсорной сети, $r_{USN}, r_{2G}, r_{3G}, r_{4G}$ – радиус связи узла USN и терминалов других сетей (2G, 3G и 4G).

Следует ожидать, что в гетерогенных сетях вероятность доступности (связность) увеличивается с ростом числа терминалов, поддерживающих различные технологии, такие как 2G, 3G, 4G, WiFi и т.д.

В третьей главе представлена модель БСС, построенная с использованием модели графа, в котором узлы сети представлены вершинами, а линии (каналы) связи ребрами. В модели БСС наличие ребра между вершинами определяется расположением узлов и характеристиками зон их радиосвязи. Случайный характер наличия связи между узлами БСС позволяет предположить возможность выбора в качестве ее модели случайный граф.

В качестве модели БСС выбрано случайный граф $G = (V_n, E)$, где $V_n = \{1, \dots, n\}$ – множества вершин, E – случайное множество ребер. Существует несколько теорем для данной модели. Одна из них описывает метод оценки связности графа (теорема Эрдеша-Реньи).

Рассмотрим граф $G(n, p)$. Пусть $p = c \frac{\ln(n)}{n}$. Если $c > 1$, то почти всегда случайный граф связный. Если $c < 1$, то почти всегда случайный граф не является связным.

Для нашего случая смысл теоремы состоит в том, что при $c = 1$ вероятность связности графа $P_{св}$ определяется некоторой пороговой величиной p_0 . При $c < 1$ вероятность связности графа меньше этой величины, а при $c > 1$ больше нее. С точки зрения задач построения БСС, по величине c можно судить о том, в какой степени решена задача связности.

Для изучения связности рассматриваемой сети и проверки применимости теоремы разработана имитационная модель. Она генерирует заданное количество узлов со

случайными координатами в ограниченной 3D области, а затем находит кратчайшие пути между всеми парами узлов с помощью алгоритма поиска кратчайшего пути. Затем оценивается доля найденных путей из общего числа возможных. Полученное отношение является оценкой вероятности связности. Рассматриваемая область размещения узлов представляет собой куб ($V = 250 \times 250 \times 250 \text{ м}^3$). Полагаем, что узлы распределены случайным образом, т.е. образуют пуассоновское поле, рисунок 3.

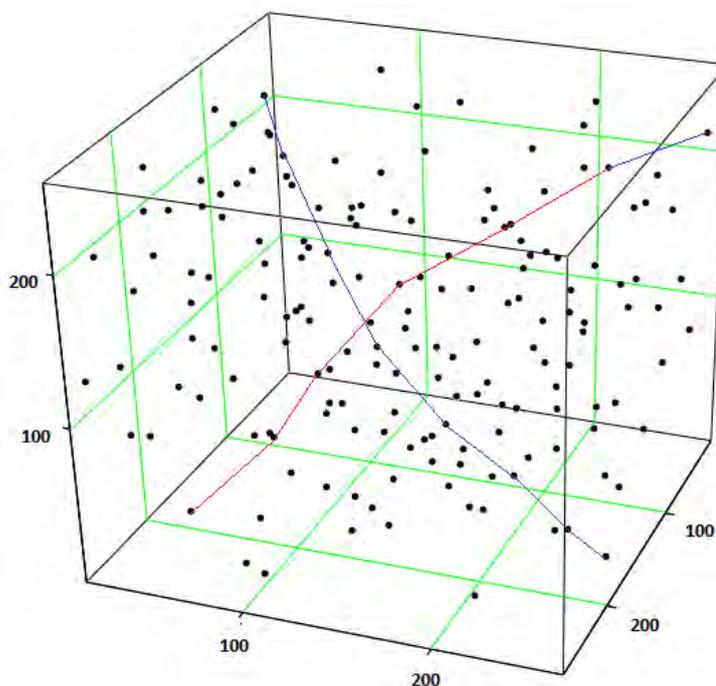


Рисунок 3 – Модель сети в области ограниченной кубом (примеры прокладки кратчайших маршрутов между двумя парами узлов сети)

В ходе эксперимента количество узлов в кубе меняется от 20 до 100. Принимая во внимание характеристики стандартов ZigBee и Bluetooth, радиус связи выбран от 50 до 100 м. Результаты моделирования показаны на рисунке 4.

Поскольку узлы сети образуют пуассоновское поле, то вероятность существования связи (существования ребра) будет описываться вероятностью попадания случайной точки (узла) в область, ограниченную шаром радиуса R :

$$p = \frac{V_{\text{шар}} \rho}{n}, \quad (2)$$

где p – вероятность попадания узлов в радиус действие узла; ρ – плотность узлов сети (узлов/м³); n – общее число узлов сети; $V_{\text{шар}} = \frac{4\pi R^3}{3} \text{ м}^3$; R – радиус связи узла.

Сопоставляя величину p с пороговой вероятностью, которую из теоремы Эрдеша-Реньи определим как

$$p_0 = \ln n / n, \quad (3)$$

оценим вероятность связности сети при заданных параметрах R и n . Приблизительное значение вероятности связности можно получить с помощью формулы (4)

$$p_c = e^{-e^{-c}}, \quad (4)$$

где c – константа из выражения $p_0 = \frac{\ln n + c}{n}$. При $c=0$ вероятность связности $p_c = e^{-1} \approx 0,37$.

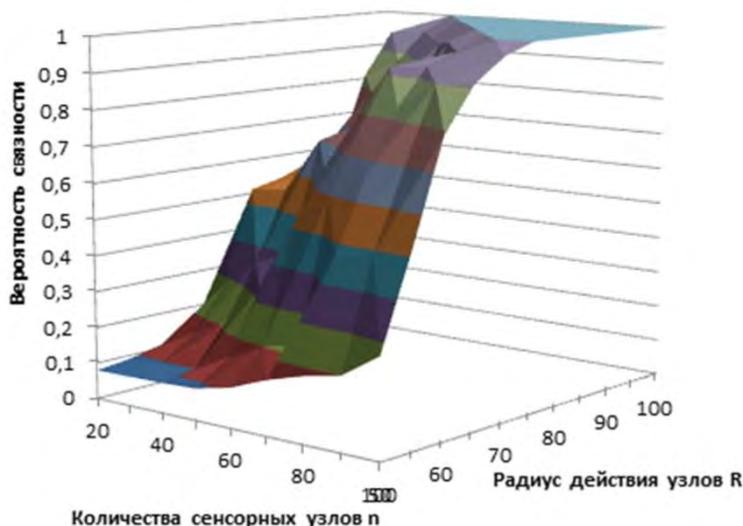
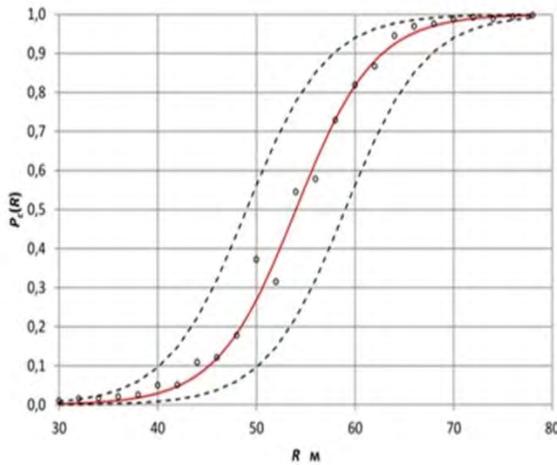


Рисунок 4 - Зависимость вероятности связности от радиуса связи R и числа узлов n в области ограниченной кубом

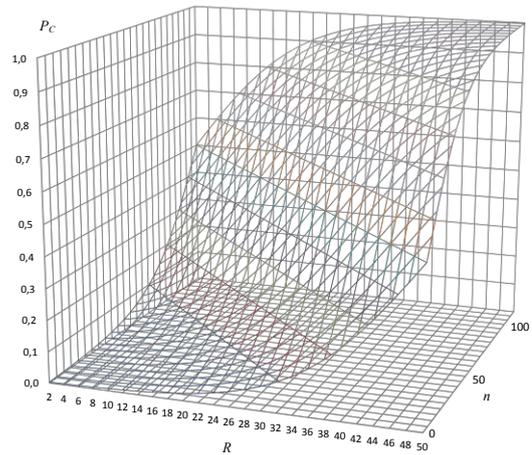
Для исследования зависимости связности сети от радиуса связи узлов при фиксированном их количестве была разработана имитационная модель. На рисунке 4 приведена зависимость вероятности связности сети, вычисляемая методом имитационного моделирования от радиуса узлов сети при $n = 100$. Согласно полученным результатам, вероятность связности в этой точке равна 0,34 при $R = 52$ и 0,55 при $R = 54$. При линейной экстраполяции для вероятности связности 0,37 получаем $R = 52,4$. Пороговая вероятность согласно (3) $p_0 = 0,046$, а вероятность попадания в шар для этого радиуса по (2) равна 0,039. Разница между этими значениями составляет 15%. Результаты моделирования аппроксимировались с помощью S -кривой (5).

$$\tilde{p}_c(R) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{R-r_0}{b}}}, \quad (5)$$

где R и r_0 – параметры, полученные при численном приближении кривой к данным моделирования. На рисунке 5а, верхняя и нижняя границы доверительного интервала приведены для уровня значимости 5%. Доверительный интервал включает теоретическую точку p_0 , согласно теореме и аппроксимации. На рисунке 5б приведена зависимость от двух параметров: радиуса связи и количества узлов в сети.



а)



б)

Рисунок 5 - Зависимость вероятности связности от радиуса узлов R в кубе при $V = 250 \text{ м}^3$ (а) и зависимость вероятности связности от радиуса и количества узлов (б)

Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать, что теорема Эрдеша-Реньи применима для оценки связности БСС.

При исследовании применимости модели случайного графа для описания связности сети было проведено имитационное моделирование, при котором оценивалось среднеквадратическое отклонение (СКО) связности. На рисунке 6 показана зависимость СКО вероятности связности сети от числа узлов сети.

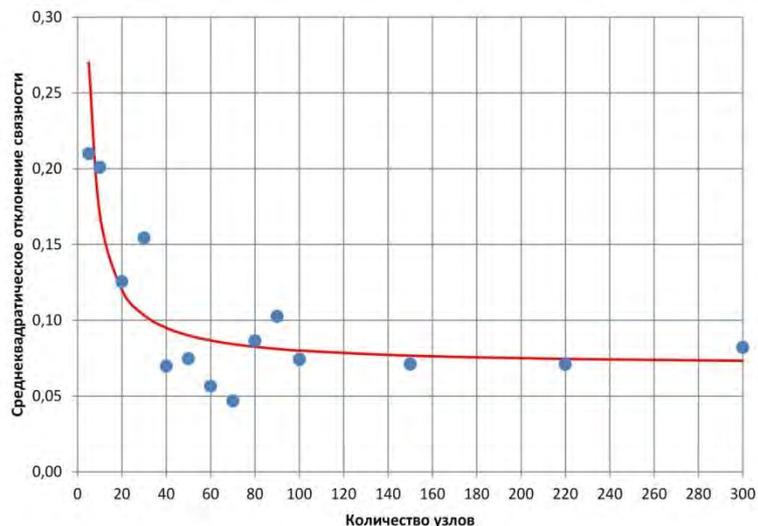


Рисунок 6 - Зависимость СКО вероятности связности сети от числа узлов сети

Как видно из рисунка 6, СКО, а следовательно и ошибка оценки связности, снижается по закону, близкому к $1/n$. Она максимальна при малом n , и стабилизируется при $n > 50$ на уровне 10% от оцениваемой величины. Таким образом, при относительно малом числе узлов сети ошибка оценки связности с помощью модели случайного графа может быть слишком велика. Для практических расчетов при числе узлов 50 и более ошибка достаточно мала (менее 10%).

Когда вероятность связности узла p меньше пороговой вероятности p_0 , сеть распадается на кластеры. Для обеспечения связности кластеров нужно увеличивать радиус связи R или количество узлов сети путем введения дополнительных узлов.

Задача обеспечения связности решается при известных координатах узлов сети. Опишем сеть моделью полносвязного неориентированного графа, в котором каждая вершина соответствует узлу рассматриваемой сети. Полагаем, что известны координаты узлов БСС, на основе которых может быть вычислена матрица расстояний между узлами наземного сегмента $D = \{d_{ij}\}$, $i, j = 1 \dots n$. В данной матрице, для пространственной модели (3D) каждый из элементов вычисляется с помощью формулы (6).

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (6)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты узлов сети $i=1 \dots n$, n – количество узлов.

Матрица D описывает длины ребер графа. Будем полагать, что зона связи каждого из узлов сети также представляет собой шар с радиусом r .

Для решения задачи поиска точек размещения для дополнительного узла предлагается следующий алгоритм.

1. Описание сети моделью неориентированного графа матрицей расстояний между вершинами D .

2. Нахождение минимального остова графа. (Возможно с помощью алгоритма Прима или алгоритма Краскала).

3. Удаление из найденного минимального остова графа ребер, длина которых превышает радиус связи узла r , и пометка инцидентных им вершин $v1$.

4. Если число удаленных ребер равно нулю, то все точки размещения дополнительного узла определены и связность сети обеспечена, **остановка процесса поиска**. Если нет, то выполнять следующий пункт (п.5).

5. Кластеризация помеченных вершин ($v1$) с помощью алгоритма FOREL при размере кластера r , и определение центров кластеров.

6. Проверка числа помеченных вершин ($v1$) в найденных кластерах пометка этих вершин $v2$ и удаление кластеров содержащих только одну вершину. Если после удаления число кластеров, содержащих более одной вершины больше нуля, то идти к следующему пункту (п.7). Если число оставшихся кластеров равно нулю (все кластеры содержат по одной вершине с пометками $v2$), то идти к п.8.

7. Добавление в граф вершин в точках, совпадающих с центрами оставшихся кластеров. Эти вершины соответствуют точкам размещения дополнительных узлов, выполняющих роль транзитных узлов, идти к п.2.

8. Выбрать первую из вершин с пометкой $v2$, по матрице расстояний найти ближайшую ей вершину с аналогичной пометкой $v2$. Добавить в граф m вершин

$$m = \left\lceil \frac{L}{r} \right\rceil - 1, \quad (7)$$

на удалении от первой вершины

$$d_i = i \left\lceil \frac{L}{r} \right\rceil, \quad i = 1 \dots n, \quad (8)$$

где знак $\lceil \cdot \rceil$ означает округление с избытком, а i -номер добавляемой вершины. Снять пометки $v2$ с рассмотренных вершин. Координаты добавленных вершин соответствуют координатам дополнительных узлов, обеспечивающим связность рассмотренных вершин [2,5].

Выполнить аналогичные операции для всех вершин с пометками $v2$.

Идти к п.2.

На рисунке 7 приведены возможные планы размещения дополнительных узлов для обеспечения связности сети (в 3D и 2D областях, для большей наглядности).

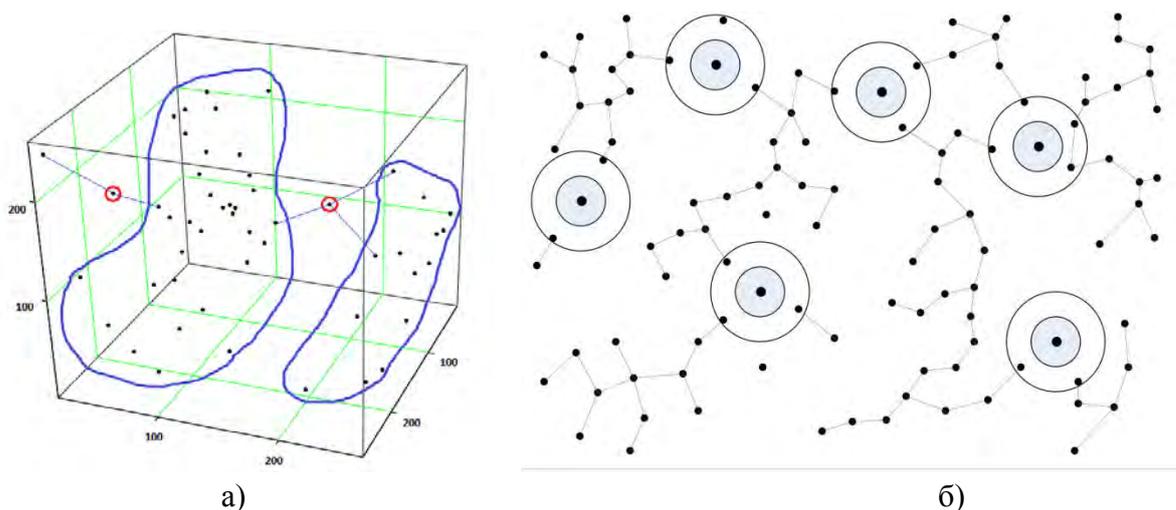


Рисунок 7 - Пример восстановления связности БСС с помощью дополнительных узлов для 3D (а) и 2D областей (б)

При ограниченном количестве дополнительных узлов, в общем случае, вероятность связности может быть меньше единицы, т.е. возможно останутся несвязные компоненты графа. В этом случае целесообразно ввести оценку качества решения задачи, при этом под качеством следует понимать степень достижения желаемого результата. Очевидно, что при равной значимости всех узлов сети, такой оценкой может служить вероятность связности, т.е. вероятность доступности любого узла любому узлу сети.

Как один из возможных вариантов, рассмотрим задачу обеспечения связности в сети при различной значимости ее узлов. Припишем каждому из узлов сети весовой коэффициент, отражающий степень его значимости $k_i, i=1 \dots n$. Тогда при выборе вариантов размещения дополнительных узлов для обеспечения связности компонент графа следует учитывать степень значимости узлов каждой из компонент. Для этого для каждой из

компонент графа также введем коэффициент значимости η_s , где $s=1\dots C$, C - количество компонент графа, полученное после выполнения п.3 приведенного выше алгоритма.

$$\eta_s = \sum_{i=1}^g k_i \quad (9)$$

где g – количество узлов, входящих в i -ю компоненту графа.

Далее будем приписывать этот коэффициент каждому из шарниров, входящему в данную компоненту.

В данном случае п.5 приведенного алгоритма должен выполняться с учетом введенных коэффициентов значимости. При выполнении алгоритма кластеризации данные коэффициенты должны учитываться при вычислении центров масс кластеров. Это дает возможность, в первую очередь обеспечить связность для компонент, которые в целом имеют большую значимость для сети.

Реализация и использование приведенного алгоритма позволяет обеспечивать или восстанавливать связность наземной самоорганизующейся сети, содержащей относительно большое количество узлов.

Четвертая глава посвящена анализу зависимостей основных показателей качества обслуживания трафика в самоорганизующейся сети связи от параметров маршрута и скорости перемещения узлов. Введен показатель эффективной связности, характеризующий возможность передачи данных между узлами сети и ее зависимость от параметров сети.

Принято считать, что вероятность связности характеризует потенциальную возможность выполнения сетью ее функций. Действительно, вероятность связности описывает шансы наличия маршрута между источником и получателем данных (достижимости получателя).

$$p_c = \frac{n_p}{n^2 - n} \quad (10)$$

где n_p - количество возможных маршрутов,

n - количество узлов в сети.

Однако, эта вероятность никак не отражает возможность доставки данных по этим маршрутам, так как она определяется на основе всего множества потенциально возможных маршрутов, равно как самых коротких, так и самых протяженных. При этом самый короткий маршрут эквивалентен самому протяженному, в своем вкладе в вероятность связности. Очевидно, что на практике маршруты не равноценны. Если каждый из участков маршрута вносит свой вклад в показатели качества, то их значения для протяженного маршрута будут ниже, чем для короткого. Возможно, что один или несколько показателей качества маршрута окажутся ниже (выше) некоторой величины, когда передача данных станет невозможной или нецелесообразной. В этом случае маршрут не может быть, фактически, использован для передачи данных. Следовательно, оценка связности только на основе потенциальной возможности создания маршрута, в практическом случае, является завышенной.

Введем понятие *эффективной связности*, которое будет учитывать наряду с потенциальной возможностью построения маршрута его пригодность с позиции качества обслуживания трафика.

Сделаем допущение, что качество обслуживания зависит от длины маршрута (количества транзитов k), $F(k)$ функция распределения длины маршрута, а $q(k)$ функция определяющая зависимость некоторого показателя качества q от длины маршрута. Тогда вероятность того, что длина маршрута не превышает k_0 «скачков» будет определяться как

$$p(K < k_0) = F(k_0), \text{ где } k_0 = \arg\{q(k) = q_0\} \quad (11)$$

где q_0 – значение параметра качества, при котором использование маршрута невозможно.

Тогда эффективная связность, с учетом (10) и (11) будет определяться вероятностью его наличия маршрута и вероятностью того, что длина маршрута не превышает k

$$p_E = p_C F(k_0) \quad (12)$$

Таким образом, эффективная связность, в данном случае определяется как вероятность существования маршрута, с количеством скачков не более k_0 .

Аналогично может быть получена зависимость эффективной связности и от других параметров сети, скорости движения узлов, интенсивности трафика и пр.

Для анализа зависимостей показателей функционирования БСС от параметров сети была разработана имитационная модель в системе OMNeT++.

В качестве модели сети была выбрана гомогенная сеть на основе технологии Wi-Fi (IEEE 802.11g). Максимальный радиус действия узлов, при взаимодействии друг с другом составляет 50 метров. Среда распространения радиосигнала считается идеальной (без учета помех). Максимальная мощность передатчика 100 мВт. В качестве протокола маршрутизации используется AODV. Используемый протокол транспортного уровня TCP.

При моделировании рассматриваются два случая. Первый, когда все узлы неподвижны, в этом случае производится анализ зависимости пропускной способности от количества транзитных узлов в маршруте (рисунок 8). Второй, когда узлы сети подвижны, за исключением двух узлов производящих взаимодействие друг с другом. Область обслуживания сети, представляет собой квадрат со сторонами 200x200 м (рисунок 9). Сеть содержит 50 узлов. Координаты взаимодействующих узлов (передатчик и приемник) $\{0, 0\}$ и $\{200, 200\}$, они являются неподвижными. Остальные 48 узлов движутся с одинаковой скоростью. Модель движения «случайная путевая точка», средняя скорость движения выбирается в диапазоне от 0 до 10 м/с.

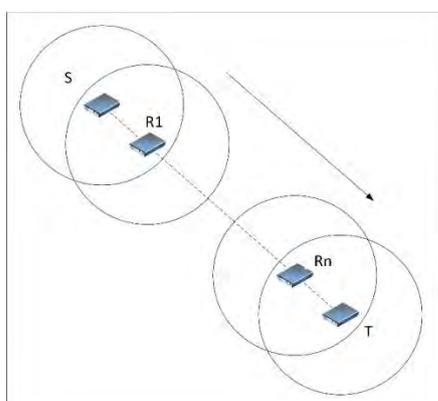


Рисунок 8 - Модель маршрута

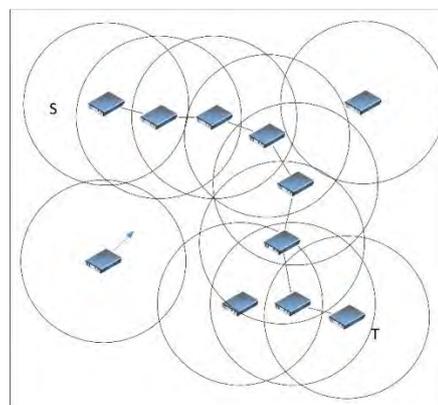


Рисунок 9 - Модель сети с подвижными узлами

Основной характеристикой маршрута в сети связи является количество транзитов (скачков). Количество транзитов существенно влияет на вероятностные и временные показатели качества функционирования. В БСС количество транзитов определяется масштабами сети (обслуживаемой территорией), характеристиками зоны связи отдельных узлов и условиями их размещения. Рассмотрим зависимость пропускной способности от числа транзитных узлов между узлами передатчика и приемника. Все узлы неподвижны. В качестве протокола транспортного уровня используется ТСР. Результаты моделирования приведены на рисунке 10.

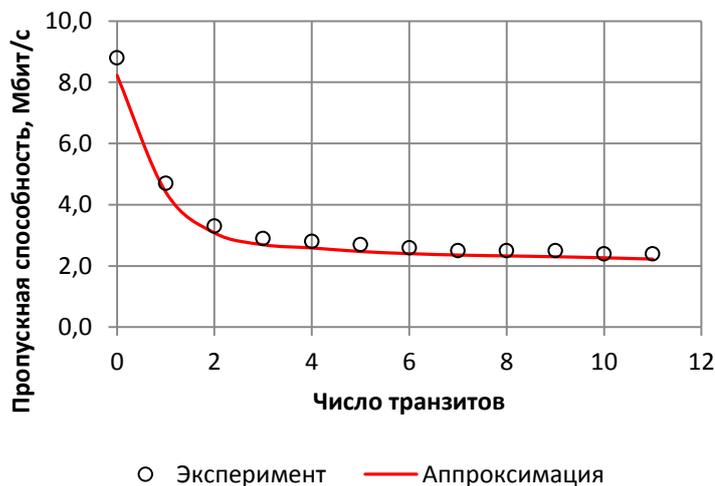


Рисунок 10 - Зависимость пропускной способности ТСР от количества транзитных узлов.

Как видно из рисунка 9 интенсивность трафика на выходе узла отправителя и на входе узла получателя одинаковы и равно 8,8 Мбит/с при непосредственном взаимодействии двух узлов, т.е. когда узлы находятся в радиусе связи друг друга. При использовании одного транзитного узла интенсивность трафика на входе узла получателя составляет 4,7 Мбит/с. При увеличении количества транзитных узлов пропускная способность маршрута уменьшается и достаточно точно аппроксимируется формулой (13)

$$b = \frac{Wnd}{RTT} \quad (\text{бит/с}) \quad (13)$$

где Wnd – размер окна передачи (бит), а RTT – время отклика (с). Размер окна в данных эксперимента составлял $Wnd = 7504$ байт. Из рисунка 9 видно, что полученные данные достаточно близки к оценкам, согласно выражению (13).

Результаты моделирования при исследовании зависимости пропускной способности от скорости движения транзитных узлов приведены на рисунке 11.

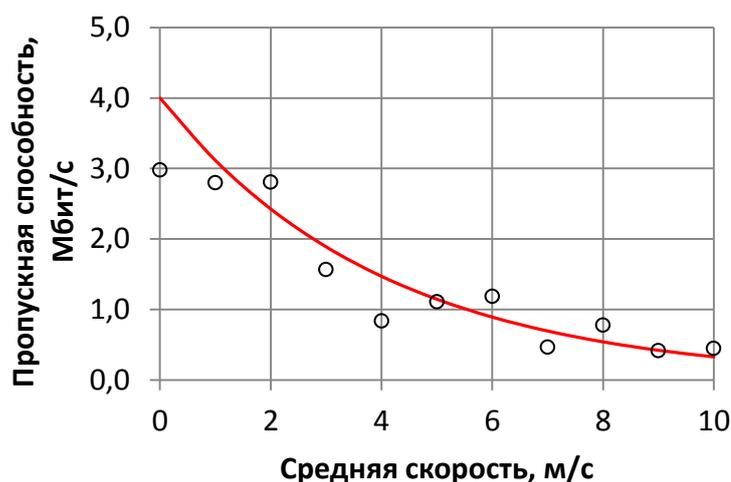


Рисунок 11 - Зависимость пропускной способности ТСП от средней скорости движения узлов сети

Полученная зависимость аппроксимирована выражением

$$B = \frac{b_0}{\beta} e^{-\eta v} \text{ Мбит/с} \quad (14)$$

где η коэффициент (по результатам эксперимента 0,25),

β - коэффициент (по результатам эксперимента $\beta = 2,0$),

v - средняя скорость перемещения узлов сети (м/с).

Вероятность связности в БСС можно оценивать с помощью теоремы Эрдеша-Реньи. Однако, она характеризует лишь БСС с неподвижными узлами. Для БСС с подвижными узлами геометрический расчет связности весьма затруднен. В данной работе мы рассмотрим приближительную оценку связности в сети с подвижными узлами через другие показатели качества ее функционирования. В качестве показателя качества функционирования сети выберем пропускную способность. Величина пропускной способности выше нуля говорит о том, что связность между узлами существует. Однако на практике, достигаемая величина пропускной способности не всегда обеспечивает требуемое качество обслуживания трафика. Будем полагать, что величина эффективной связности равна единице при максимально технологически возможной пропускной способности. Например, на основе данных полученных для зависимости от длины маршрута, получим зависимость эффективной связности от количества транзитов. Полученная зависимость приведена на рисунке 12.

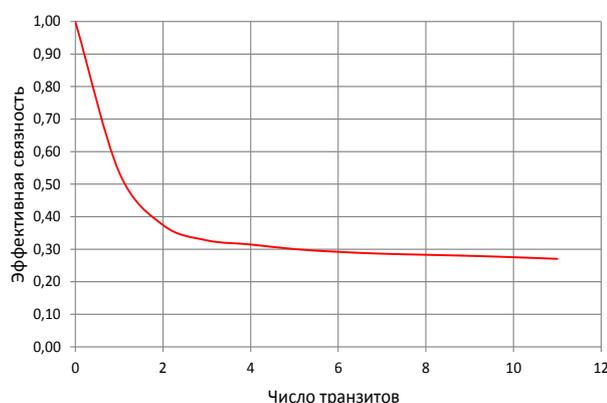


Рисунок 12 - Зависимость эффективной связности от количества транзитных узлов

Полученная зависимость аппроксимирована зависимостью

$$f(k) = \frac{1}{1 - k^\alpha} \quad (15)$$

где α - константа (в данном случае $\alpha=0,45$).

Например, из рисунка 10 видно, что максимальная пропускная способность между узлами достигает 2,98 Мбит/с, когда скорость движения узлов равна нулю. Будем полагать, что эффективная связность при этой величине скорости равна единице. С увеличением скорости движения узлов, пропускная способность маршрута уменьшается. При скорости узлов 10 м/с, величина пропускной способности составляет 0,45 Мбит/с, что соответствует 15% от максимального значения, соответствующее значение эффективной связности равно 0,15. Полученная в результате эксперимента эмпирическая зависимость приведена на рисунке 13.

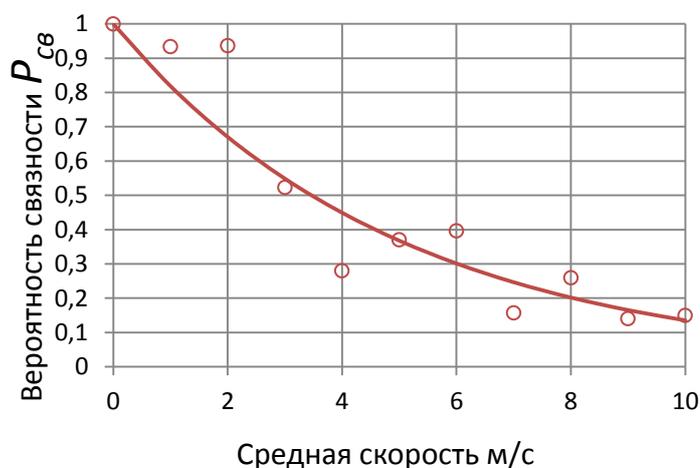


Рисунок 13 - Зависимость эффективной связности от скорости движения узлов БСС

Путем аппроксимации полученной эмпирической зависимости определена модель зависимости эффективной связности от скорости движения узлов

$$f(v) = e^{-\frac{v}{b}} \quad (16)$$

где v скорость движения узлов, b – постоянный коэффициент (по результатам эксперимента $b=5$),

На основе полученных зависимостей может быть получена оценка комплексного показателя. Как показали результаты имитационного моделирования, с учетом полученных зависимостей от количества транзитных узлов и средней скорости движения узлов, комплексный показатель может быть определен как

$$a(k, v) = f(k)f(v) = \frac{e^{-\frac{v}{b}}}{1 - k^\alpha} \quad (17)$$

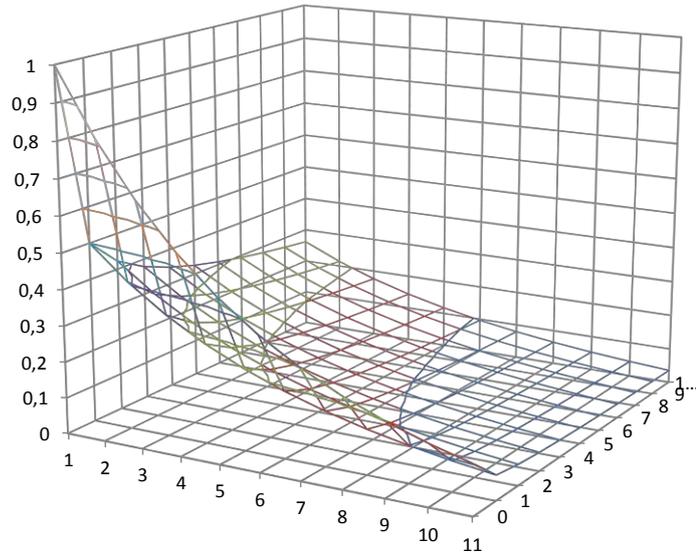


Рисунок 14. Зависимость эффективной связности от двух параметров

Выражение (17) представляет собой функцию от двух переменных (количества транзитов и скорости движения узлов). В виде графика она выглядит как показано на рисунке 14. В общем случае, количество переменных (параметров сети, влияющих на связность) зависит от тех параметров качества обслуживания, которые следует учитывать в конкретной прикладной задаче. В таком случае выражение (17) может быть представлено как

$$a(X) = \prod_{i=1}^R f(x_i) \quad (18)$$

где R – количество рассматриваемых параметров.

С использованием полученных зависимостей можно уточнить вероятность связности, т.е. определить вероятность эффективной связности. Например, с учетом качества маршрута, зависящего от его длины вероятность эффективной связности может быть определена как

$$\tilde{p}_{св} = p_{св} p(q > Q) = p_{св} F(k) \quad (19)$$

где $p_{св}$ – оценка вероятности связности, согласно (10); $p(q > Q)$ – вероятность того, что качество маршрута q не ниже требуемого Q ; $F(k)$ – функция распределения длины маршрута.

В выражении (19) k может быть определено из (15) как

$$k = \alpha \sqrt{1 - \frac{1}{B_0}} \quad (20)$$

где B_0 – заданное минимально допустимое значение пропускной способности маршрута.

С учетом качества маршрута, зависящего от скорости движения узлов вероятность эффективной связности может быть определена как

$$\tilde{p}_{св} = p_{св} F(v) \quad (21)$$

где p_{cv} - оценка вероятности связности, согласно (10); $F(v)$ - функция распределения скорости движения узлов.

В выражении (21) v может быть определено из (14) как

$$v = -b \ln B_0 \quad (22)$$

Таким образом, показатель эффективной связности отражает потенциальную возможность доставки данных между узлами самоорганизующейся сети с учетом необходимого количества параметров (факторов) влияющих на качество обслуживания трафика. Этот показатель, наряду с показателем связности может характеризовать сеть с учетом конкретных особенностей используемой технологии связи и параметров сети. При использовании различных технологий построения сети вероятность эффективной связности может существенно отличаться, так как она зависит от качества маршрута (или канала) и требований к его качеству, в то время как оценка связности согласно (10) будет одинакова, так как определяется только потенциальными возможностями установления соединения. Поэтому, использование показателя эффективной доступности более информативно для характеристики сети с точки зрения ее потенциальных возможностей.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения исследований, представленных в диссертационной работе:

1. Результаты анализа тенденций развития БСС доказывающие, что данные сети являются перспективными, а задачи их анализа и построения актуальны.

2. Результаты анализа задач построения БСС доказывающие, что задачи оценки и обеспечения связности и качества обслуживания трафика являются наиболее востребованными при планировании и построении БСС.

3. Результаты анализа методов обеспечения связности в беспроводных гетерогенных сетях, доказывающие, что для их реализации возможно применение моделей случайных графов.

4. Разработана аналитическая модель которая позволяет оценить вероятность связности сети на основе данных о количестве узлов и радиусе связи узла. Модель учитывает влияние количества узлов сети на точность результатов и позволяет определить область ее применимости.

5. Разработан метод обеспечения связности сети, который позволяет выбрать близкую к оптимальной локализацию дополнительных узлов с учетом их значимости при ограниченном ресурсе сети.

6. Разработана модель эффективной связности, позволяющая оценить возможность доставки данных в беспроводной сенсорной сети, отличающаяся от известных моделей тем, что она учитывает, как вероятность связности, так и качество обслуживания трафика.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В качестве направлений дальнейших исследований в области обеспечения связности БСС представляет интерес рассмотрение: БСС с несколькими типами узлов, имеющих различные параметры (с различными зонами связи, скоростью передачи данных, возможностью транзита или ее отсутствием); БСС с подвижными узлами и допустимыми задержками (доставка данных за счет перемещения узлов). В части выбора методов обеспечения связности, представляет интерес оценка возможности и разработка методов использования существующей инфокоммуникационной инфраструктуры (пользовательские терминалы сетей подвижной связи, публичные точки беспроводного широкополосного доступа).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

[1] Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Метод оценки и обеспечения беспроводной сенсорной сети. Электросвязь. 2017. №7. С.39-44.

[2] Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И. Эффективная связность беспроводной сенсорной сети. Электросвязь. 2018. №3. С.68-74.

Научные статьи (доклады), индексируемые в международных базах данных Scopus и/или Web of Science:

[3] Nurilloev I. Paramonov A. Koucheryavy A. Connectivity estimation in wireless sensor networks. NEW2AN/ruSMART 2016, LNCS 9870, pp. 269-277.

[4] Nurilloev I. Paramonov A. Koucheryavy A. Provision of connectivity for (heterogeneous) self-organizing network using UAV's. NEW2AN/ruSMART 2017, LNCS 10531, pp. 569-576.

Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ и доклады в материалах научных конференций:

[5] Нуриллоев И.Н., Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Прокопьев А.В. Обеспечение связности беспроводных сенсорных узлов гетерогенной сети. Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 1 (9). С. 115-122.

[6] Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И. Модель связности для беспроводных сенсорных сетей. 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио Труды конференции. 2016. С. 176-177.

[7] Нуриллоев И.Н., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Обеспечение связности наземных сегментов летающей сенсорной сети с помощью БПЛА В сборнике: Интернет вещей и 5G 2016. С. 21-25.

[8] Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И. Восстановление связности беспроводной сенсорной сети. 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио Труды конференции. 2017. С. 195-196.

[9] Нуриллоев И.Н. Исследование зависимости связности сенсорной сети от способа размещения ее узлов. / Нуриллоев И.Н., Парамонов.// СПбНТОРЭС. 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио Труды конференции. 2018. С. 226-228.

[10] Нуриллоев И.Н. Исследование зависимости связности от параметров качества функционирования БСС.// СПбНТОРЭС. 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио Труды конференции. 2018. С. 228-229.

Подписано в печать 20.09.2018.

Формат 60x84 1/16.

Печ. л. 1,0.

Тираж 100

экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 191186, Санкт-Петербург, наб.
реки Мойки, 61

