

На правах рукописи

Фугахи Абдо Ахмед Хасан

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ГОЛОВНЫХ УЗЛОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

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

Научный руководитель: **Кучерявый Андрей Евгеньевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Официальные оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**

доктор технических наук, доцент, ОАО «Центральное научно-производственное объединение «Ленинец» (ЦНПО «Ленинец»), гл. специалист, зам. главного конструктора.

Андреев Сергей Дмитриевич

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I".

Защита состоится 30.11.2017 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Московский технический университет связи и информатики" по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-448 (малый зал учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://srd-mtuci.ru/index.php/ru/council> МТУСИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. Развитие сетей связи в настоящее время осуществляется на основе концепции Интернета вещей, которая подразумевает, что все физические и виртуальные вещи будут являться терминалами сети. Наиболее распространенной технологией для реализации концепции Интернета вещей на сегодняшний день являются беспроводные сенсорные сети, которые еще называют всепроникающими, поскольку эти сети могут использоваться практически во всех областях жизнедеятельности человека.

Исследования в области беспроводных сенсорных сетей широко проводятся с начала XXI века. За это время решены многие проблемы построения и функционирования сенсорных сетей. Беспроводные сенсорные сети обладают целым рядом особенностей по сравнению с традиционными сетями связи, что требует разработки новых методов их построения и обеспечения устойчивого функционирования. Специфика применения беспроводных сенсорных сетей, в основном используемых для мониторинга процессов, явлений и событий, а также ограниченные возможности сенсорных узлов, образующих эти сети, порождают появление новых характеристик сети, таких как длительность жизненного цикла, доля покрытия пространства, остаточная энергия узлов и т.п. Множество исследований было посвящено проблемам увеличения длительности жизненного цикла беспроводных сенсорных сетей и для большинства приложений сенсорных сетей эти проблемы были успешно решены на основе создания различных методов кластеризации. Выбор головного узла кластера и его ротация на протяжении жизненного цикла беспроводной сенсорной сети являются при этом важнейшей задачей.

Параллельно с развитием беспроводных сенсорных сетей продолжалось и развитие сотовых сетей мобильной связи. На определенном этапе при создании систем длительной эволюции LTE (Long Term Evolution) эти процессы совпали и появились так называемые гетерогенные зоны базовых станций LTE. Нахождение на одной территории мобильных терминалов, беспроводных сенсорных узлов, терминалов целевых сетей транспортных средств VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) и т.п. требует исследований по возможности совместного использования их ресурсов для обслуживания пользователей и/или вещей. При этом увеличение длительности жизненного цикла является основной задачей таких исследований.

В последние годы появились работы по использованию мобильных узлов иных сетей для снятия информации с узлов беспроводной сенсорной сети, а также использования беспилотных летательных аппаратов для увеличения связности беспроводных сенсорных сетей. В диссертации предлагается использовать мобильные узлы в качестве временных головных узлов для

беспроводной сенсорной сети. С учетом изложенного и новизны предлагаемого решения тема диссертации представляется актуальной.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются беспроводные сенсорные сети, а предметом исследования – временные мобильные головные узлы для беспроводных сенсорных сетей.

Степень разработанности темы. Проблемам кластеризации беспроводных сенсорных сетей было посвящено достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых А.Е.Кучерявого, А.П.Пшеничникова, Е.В.Туруты, В.А.Мочалова, П.А.Абакумова, А.В.Прокопьева, W.Heinzelman, O.Yonis, D.Kim, K.Lindsey, A.Salim и т.д.

По использованию мобильных узлов для снятия информации с беспроводных сенсорных сетей и использованию беспилотных летающих аппаратов для увеличения связности этих сетей известны работы V.Kafle и E.P.de Freitas. Работ по использованию мобильных узлов иных сетей в гетерогенной среде в качестве временных головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети до настоящего исследования известно не было.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов использования временных мобильных головных узлов кластеров для увеличения доступности и длительности жизненного цикла беспроводных сенсорных сетей.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи:

- анализ современных направлений исследований в области беспроводных сенсорных сетей;
- анализ современных направлений исследований в области систем длительной эволюции и систем пятого поколения;
- разработка модели сенсорной сети с использованием временных мобильных головных узлов кластеров;
- определение характеристик доступности головного узла беспроводной сенсорной сети при использовании временного мобильного головного узла кластера;
- доказательство существования оптимального значения длительности раунда для разработанной модели беспроводной сенсорной сети;
- разработка методики выбора рационального значения скорости движения мобильного узла сети.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- разработана новая модель использования временных мобильных узлов для сбора данных с беспроводных сенсорных сетей, отличающаяся от известных выполнением этими узлами функций головных узлов кластеров;

- определены характеристики доступности головного узла беспроводной сенсорной сети при использовании временного мобильного головного узла кластера, при этом вероятность доступности головного узла беспроводной сенсорной сети может быть увеличена в несколько раз,

- доказано неизвестное ранее существование оптимального значения длительности раунда в беспроводных сенсорных сетях с временными мобильными головными узлами кластеров, что позволяет минимизировать затрачиваемую на кластеризацию энергию при ограничении на время доставки сообщений,

- разработана методика выбора рационального значения скорости движения мобильного узла сети, отличающаяся тем, что мобильный узел используется как временный головной узел кластера беспроводной сенсорной сети, что позволяет увеличить число обслуженных сенсорных узлов за интервал времени.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в разработке новой модели с использованием ресурсов временных мобильных головных узлов не только для сбора данных, но и для выполнения ими функций головных узлов кластеров. Кроме того, доказаны важные положения о существовании оптимального значения длительности раунда и рационального значения скорости движения временного мобильного головного узла кластера для новой модели беспроводной сенсорной сети.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании научно-обоснованных рекомендаций по планированию беспроводных сенсорных сетей с временными мобильными головными узлами кластеров. При этом достигаются лучшие энергетические показатели беспроводных сенсорных сетей и увеличение длительности жизненного цикла.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в учебном процессе кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий.

Тематика и область диссертации. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций: п.2 «Исследование процессов генерации, представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио- и мультимедиа информации; разработка рекомендаций по совершенствованию и созданию новых соответствующих алгоритмов и процедур», п.3 «Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств», п. 12. «Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного

хозяйства», п. 14. «Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Новая модель сенсорной сети с временными мобильными узлами расширяет область их применения на использование в качестве временных мобильных головных узлов кластеров.

2. Вероятность доступности головного узла беспроводной сенсорной сети может быть увеличена в несколько раз при использовании временного мобильного головного узла кластера.

3. Длительность раунда для беспроводных сенсорных сетей с временными мобильными головными узлами кластеров имеет оптимальное значение, соответствующее минимуму затрачиваемой энергии на кластеризацию при ограничении на время доставки сообщений.

4. Методика определения скорости движения временного мобильного головного узла кластера для беспроводной сенсорной сети позволяет осуществить выбор рационального значения скорости, обеспечивающего увеличение числа обслуженных сенсорных узлов за интервал времени.

Степень достоверности и апробация результатов. Публикации по теме диссертации.

Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата и достаточно широким обсуждением результатов диссертации на конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и семинарах: на 17-й и 18-й международных конференциях «International Conference on Advanced Communications Technology» (ИКАСТ 2015, 2016); на семинаре «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире», ЛЭТИ, (Санкт-Петербург, 2013); на 69-й конференции СПбНТОРЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2014); на 67-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов СПбГУТ, Санкт-Петербург, 28-29 мая 2013; на 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.

Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 2 статьи в зарубежном научно-техническом сборнике (Scopus), 2 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 статья в журналах, включенных в РИНЦ, и тезисы докладов в количестве 4-х в материалах научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает Введение, 4 главы, Заключение, Список сокращений и условных обозначений, словарь терминов и список литературы,

включающий 85 наименований. Работа изложена на 118 страницах, содержит 34 рисунка, 1 таблицу и 2 приложения.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обоснована актуальность диссертации, рассмотрено состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертации, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, методология и методы диссертации, приведена область их применения, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, описана структура диссертации и ее объем, краткое содержание глав диссертации.

В первой главе рассмотрена возможность конвергенции интернета вещей и систем длительной эволюции. Кроме того, проведен системный анализ концепции интернета вещей и представлены основные задачи и проблемы, которые нужно преодолеть для ее масштабного внедрения. Также были изучены этапы развития сетей мобильной связи от аналоговых систем 1G до цифровых широкополосных систем 4G, в частности, LTE-Advanced.

Вторая глава посвящена современным методам обслуживания трафика в гетерогенных зонах LTE. При этом рассматриваются: кооперативная коммуникация, которая обеспечивает виртуальную MIMO-систему для надежной доставки сообщений; всепроникающие сенсорные сети, области их применения и основные методы кластеризации беспроводных сенсорных сетей; летающие сенсорные сети.

В третьей главе разработана новая модель сенсорной сети с использованием временных мобильных головных узлов, в качестве которых могут выступать терминалы LTE, узлы VANET, квадрокоптеры летающих сенсорных сетей.

Модель представляет собой пуассоновское сенсорное поле, которое полностью расположено в гетерогенной зоне LTE. Шлюз находится в центре сенсорного поля на расстоянии 500 м от базовой станции LTE. 100 сенсорных узлов распределены изначально случайным образом на плоскости размером 200x200 м. Сенсорные узлы стационарны. Радиус действия сенсорного узла 20 м, запас энергии в каждом узле – 2Дж, расход энергии на прием – 50 нДж/бит, на передачу – 50 нДж/бит и дополнительно 100 пДж/кв.м. Все сенсорные узлы однородны, т.е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики. Сенсорное поле кластеризовано. В соответствии с практикой использования алгоритма *LEACH* доля головных узлов предопределена в количестве 5% от общего числа сенсорных узлов. Период, в течение которого структура неизменна, называется раундом.

Через сенсорное поле 1 раз в 100 раундов проходит мобильный узел иной сети со скоростью 2 м/с (типичная скорость для мобильных сенсорных сетей), который становится головным узлом для пересекаемых им кластеров. Точка входа этого узла в сенсорное поле случайна. Также случайным является номер первого раунда для временного мобильного головного узла (ВМГУ). После входа мобильный головной узел пересекает сенсорное поле параллельно сторонам квадрата. Этот мобильный узел становится временным головным в первом же целом раунде после его появления в сенсорном поле.

Мобильный головной узел считается выбывшим из сенсорного поля в момент времени, когда наступает очередной раунд, и до пересечения границы сенсорного поля этому узлу остается времени меньше, чем длительность раунда. При этом он уже не может быть избран временным головным узлом. При наличии ВМГУ в сенсорном поле число выбираемых головных узлов из членов кластера уменьшается на единицу. Данные, собранные за время пребывания в роли головного узла, мобильный временный головной узел передает на шлюз или базовую станцию (рисунок 1).

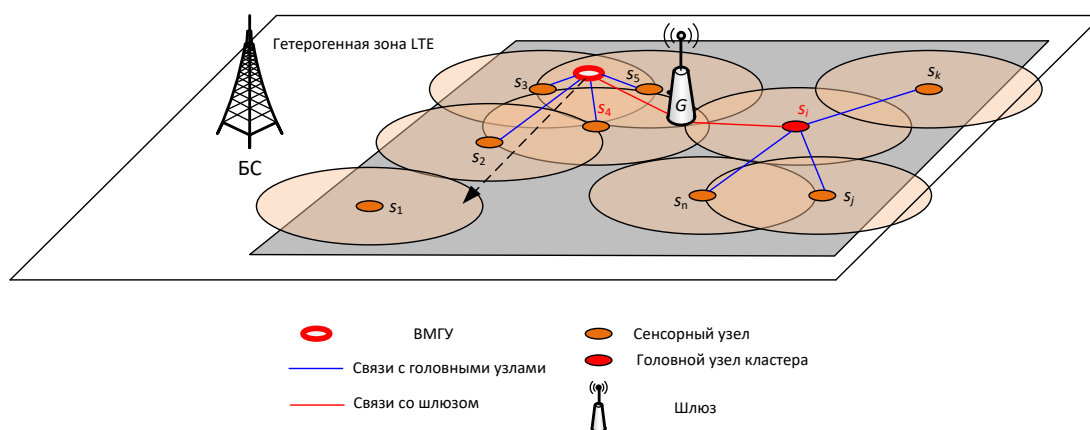


Рисунок 1 – Модель сети

При использовании алгоритма кластеризации *LEACH* структура сети выбирается (изменяется) периодически. В начале раунда выбирается некоторое количество головных узлов, которые и определяют кластеры сети. Число и расположение головных узлов случайно, определяется только среднее значение (доля) головных узлов. Таким образом, для узла сети вероятность оказаться в зоне действия головного узла меньше единицы, следовательно, меньше единицы и вероятность того, что сообщение будет отправлено. ВМГУ временно являются дополнительными головными узлами сети, поэтому следует ожидать увеличения вероятности доставки сообщения в течение раунда.

Узлы сети расходуют энергию источников питания на прием и передачу данных, при этом наибольшую долю энергии затрачивают головные узлы кластеров, так как они обслуживают передачу сообщений от нескольких узлов – членов кластеров. При наличии ВМГУ сети, эти узлы

«принимают на себя» энергетические затраты, связанные с передачей некоторой доли сообщений, поэтому следует ожидать снижения расходов энергии узлами сенсорной сети, и следовательно, увеличения ее продолжительности жизни.

Была так же определена вероятность доступности головного узла кластера, ведь, в общем случае, вероятность того, что за d раундов сенсорный узел получит возможность отправки сообщения (доступен головной узел), определится как:

$$p_c(d) = 1 - \left(e^{-\pi^2 \rho_H} \right)^d = 1 - e^{-\pi^2 \rho_H d} \quad (1)$$

Здесь: $\rho_H = \rho \eta$ – плотность головных узлов; $\rho = \frac{n}{S}$ – плотность узлов сети (узлов/кв.м); n – общее число узлов сети.

Зависимость (1) от времени (при длительности раунда равной 5 с, как правило, используемой в работах по выбору головных узлов) для различной доли головных узлов приведена на рисунке 2.

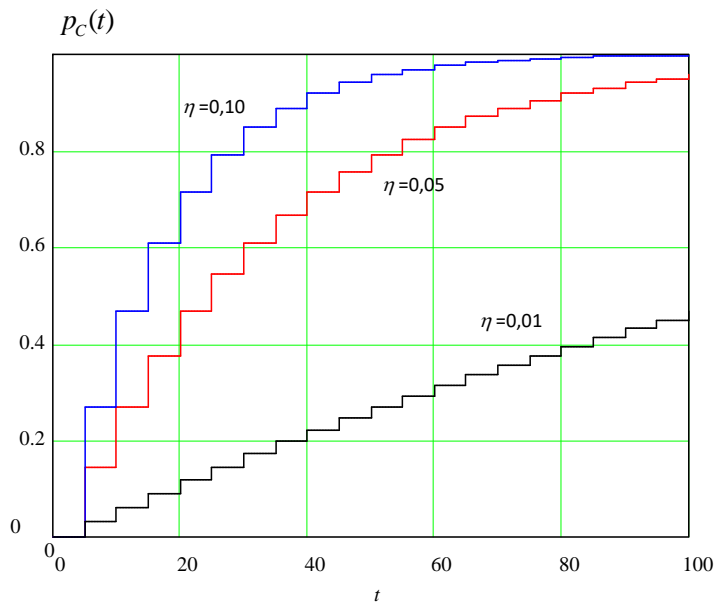


Рисунок 2 – Зависимость вероятности доступности узла от числа раундов для различной доли головных узлов

Определим вероятность доступности временного мобильного головного узла.

При вхождении в зону обслуживания сенсорной сети мобильного узла иной сети в первом же целом раунде кластеризации он становится головным узлом. Таким образом, в начале раунда ВМГУ с вероятностью равной единице доступен всем сенсорным узлам кластера, а с течением времени t вероятность доступности ВМГУ уменьшается. Вероятность доступности ВМГУ можно определить как отношение площадей пересечения окружностей и зоны обслуживания (в течение длительности раунда).

На рисунке 3 приведена модель, иллюстрирующая перемещение ВМГУ.

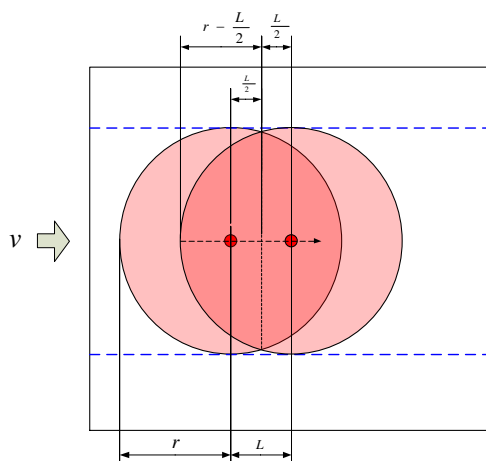


Рисунок 3 – Перемещение ВМГУ

С учетом того, что раунды происходят периодически и их длительность постоянна и равна T_0 , вероятность доступности ВМГУ будет представлять собой периодическую функцию с периодом равным длительности раунда:

$$p_a(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{p}_a(t)}{\pi^2} & (0 \leq t < T_0) \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (2)$$

где:

v – скорость перемещения головного узла (м/с); r – радиус зоны действия головного узла.

На рисунке 4 приведена зависимость вероятности доступности ВМГУ от времени при различной скорости его движения с момента начала раунда.

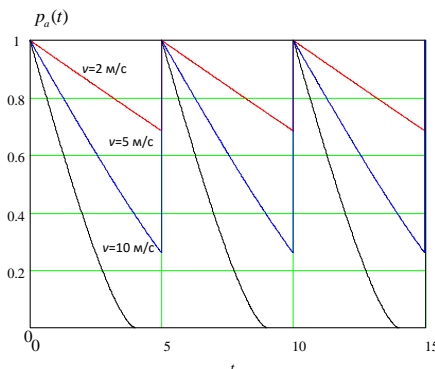


Рисунок 4 – Изменение вероятности доступности ВМГУ от времени для разных скоростей в течение нескольких раундов

В случае доступности мобильного узла иной сети он, безусловно, выбирается головным, зависимость вероятности его доступности от времени приведена на рисунке 5.

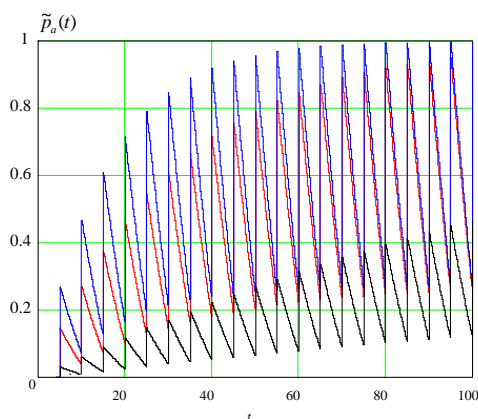


Рисунок 5 – Изменение вероятности доступности ВМГУ от времени для разных плотностей в течение 20 раундов

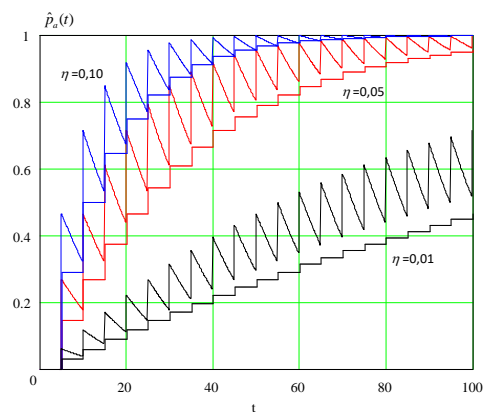


Рисунок 6 – Изменение вероятности доступности любого из головных узлов для разных плотностей в течение 20 раундов при наличии и отсутствии ВМГУ

Из рисунка 6 видно, что при использовании мобильных узлов иных сетей в качестве ВМГУ сенсорной сети вероятность доступности головного узла существенно увеличивается, а, следовательно, увеличивается и длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети.

Для обработки результатов аналитического моделирования использовался пакет Mathcad.

Четвертая глава посвящена вопросу определения значения длительности раунда для беспроводных сенсорных сетей с временными мобильными головными узлами кластеров и параметрам, влияющим на это значение.

Одним из основных параметров, характеризующих качество функционирования БСС, является время доставки данных, которое, в свою очередь, зависит от связности сети. С периодичностью равной продолжительности раунда, сетевые элементы выполняют работу по реконфигурации сети, которая приводит к расходу энергии. Таким образом, чем меньше продолжительность раунда, тем выше частота выполнения работы сетью и выше расход энергии.

Поскольку при использовании алгоритмов кластеризации, таких как *LEACH*, в любом случае, необходимо определять интервал кластеризации, т.е. раунд, то целесообразно определить его как интервал, через который происходит пробуждения узла для выполнения функций кластеризации и передачи данных. Таким образом, продолжительность раунда является параметром, определяющим расход энергии узлами, и, следовательно, время жизни сети.

При выполнении операции реконфигурации, т.е. выбора головного узла вначале каждого из раундов, элементы сети выполняют работу по передаче и приему служебных сообщений. Таким образом, в начале каждого раунда будет затрачиваться энергия:

- на передачу сообщений в направлении головной узел – члены кластера $E_{Tx}^{(H-M)}$;
- на прием этих сообщений членами кластера $E_{Rx}^{(M)}$;

-на передачу сообщений в направлении член кластера - головной узел $E_{Tx}^{(M-H)}$;

-на прием этих сообщений головными узлами кластеров $E_{Rx}^{(H)}$.

Суммарный расход энергии составит (рисунок 7):

$$E_{\Sigma} = t\lambda(E_{Tx}^{(M-H)} + E_{Rx}^{(H)} + E_{Tx}^{(H-S)}) + \left\lfloor \frac{t}{T_0} \right\rfloor E_C \quad (3)$$

Если расходуемая на передачу полезной информации энергия зависит только от интенсивности информационных сообщений, и может в данном случае, рассматриваться как постоянная величина, то минимум затрачиваемой энергии будет определяться минимумом энергии, затрачиваемой на кластеризацию. Тогда минимум расходуемой энергии достигается минимизации величины $\left\lfloor \frac{t}{T_0} \right\rfloor E_C$. Очевидно, что при постоянной величине E_C , этот минимум

достигается при максимальном значении T_0 . При ограничении на время доставки T_D сообщений

$$\min_{T_0} \left(\left\lfloor \frac{t}{T_0} \right\rfloor E_C \right) \quad (4)$$

при $T_0 \leq \frac{\pi r^2 \cdot \rho(\eta + \eta_M)}{-\ln(1-\alpha)} T_D$. (5)

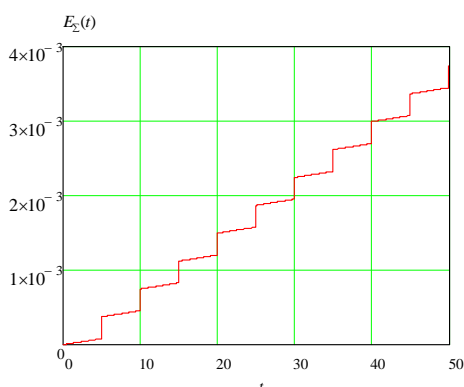


Рисунок 7 – Зависимость суммарного расхода энергии сетью от времени

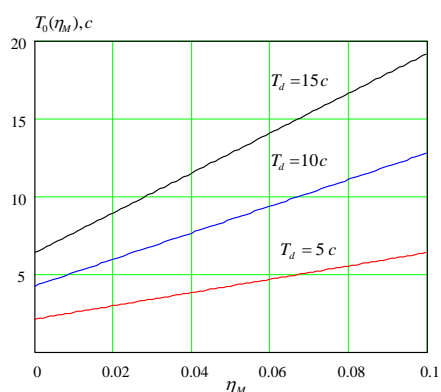


Рисунок 8 – Зависимость максимального значения длительности раунда от доли подвижных головных узлов

Из (4) видно, что минимум затраченной на кластеризацию энергии имеет место при максимально допустимом значении T_0 и определяется выражением (5).

Как видно из рисунка 8, увеличение доли подвижных головных узлов приводит к возможности увеличения длительности раунда (при заданных вероятности и времени доставки сообщения). Это, в свою очередь, позволяет уменьшить долю энергии, расходуемой на операции кластеризации.

В этой главе определяются также рациональное значение скорости движения временного мобильного головного узла для максимального числа обслуженных узлов.

Для оценки времени пребывания головного узла в зоне связи сенсорного узла в работе была рассмотрена модель движения ВМГУ в радиусе связи (R) произвольного узла БСС. Подвижной головной узел входит в зону связи рассматриваемого узла в произвольной точке a и движется прямолинейно до выхода из зоны связи в произвольной точке b , рисунок 9.

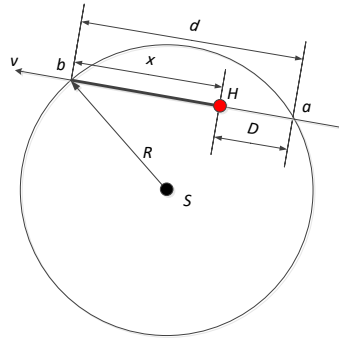


Рисунок 9 – Модель движения головного узла в зоне связи сенсорного узла

1. При этом головной узел проходит путь d . Если скорость движения головного узла постоянна и равна v , то время его пребывания в зоне связи

$$t_A = \frac{d}{v} \quad (6)$$

Длина отрезка ab случайна, ее функция плотности вероятности дается как длина случайной хорды.

Время нахождения подвижного узла в зоне связи будет случайной величиной с функцией распределения (рисунок 10):

$$q(t) = \frac{1}{\pi R \sqrt{1 - \left(\frac{v}{2R} t\right)^2}} \quad (7)$$

где v – скорость перемещения подвижного узла.

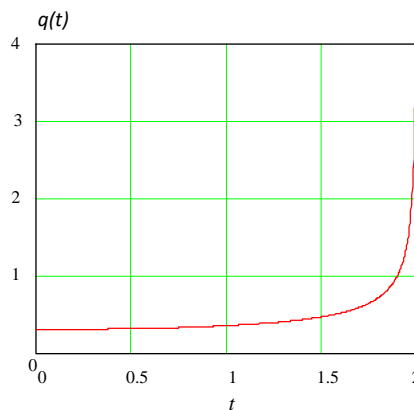


Рисунок 10 – Плотность вероятности длины пути узла в зоне связи ($R=50$ м, $v=25$ м)

2. Предположим, что узел, потенциально способный быть головным узлом, двигаясь по данной траектории в зоне действия узла S сенсорной сети, становится головным узлом в некоторый случайный момент времени, т.е. в случайной точке H отрезка ab . Так как точка H занимает случайное положение на отрезке ab , то длина отрезка x , будет равна:

$$x = \begin{cases} d - D & D < d \\ 0 & D \geq d \end{cases} \quad (8)$$

где D случайная величина с равномерным законом распределения с плотностью вероятности

$$h(x) = \frac{1}{M} \quad (9)$$

где M – период изменения конфигурации сети (кластеризации). Диапазон значений, принимаемых D , - от 0 до M . Тогда случайная величина x принимает значения от 0 до $2R$.

Плотность вероятности случайной величины $x = d - D$ может быть оценена как плотность вероятности композиции случайных величин $f(x)$ и будет иметь вид, приведенный на рисунке 11, полученный методом имитационного моделирования для различных значений D .

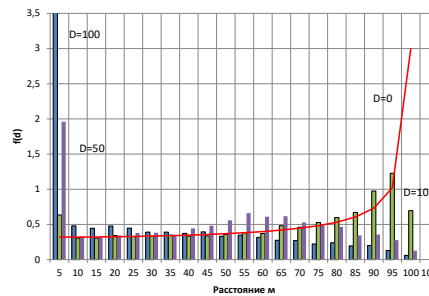


Рисунок 11 – Плотности вероятности $f(d)$, полученная методом имитационного моделирования

Рассмотрим процесс передачи данных подвижным узлом сети. Будем полагать, что узел движется в зоне обслуживания WSN , узлы которой образуют пуассоновское поле точек. Радиус связи подвижного узла равен R , каждый из узлов сенсорной сети, попадающий в радиус связи может передать данные через подвижный узел. При допущении экспоненциальной продолжительности обслуживания, процесс передачи данных, может быть описан моделью системы массового обслуживания $M/M/1/k$, на вход которой поступает простейший поток заявок. Потеря заявки происходит в том случае, когда узел сети выходит из зоны связи подвижного узла прежде, чем он будет обслужен.

Увеличение скорости перемещения подвижного узла приводит к увеличению числа обслуженных узлов, т.е. к росту интенсивности потока данных λ на входе и увеличению интенсивности обслуженного трафика, однако это также приводит к росту вероятности потерь (доли необслуженных узлов).

Вероятность того, что попавший в зону связи подвижного узла, узел WSN будет обслужен, равна (Рисунок 12)

$$p_s = 1 - \frac{(1-a)^K}{1-a^{K+1}}, \quad (10)$$

где K – размер буфера, $a = \frac{\lambda(v)}{\mu}$.- интенсивность нагрузки (Эрл);

μ - интенсивность обслуживания (узлов/ед. времени),

$$\lambda(v) = 2R\rho v \quad (11)$$

В данном случае, размер буфера K характеризует число узлов WSN, находящихся в зоне связи подвижного узла, которые будут обслуживаться или «получать отказ», при выходе из зоны связи.

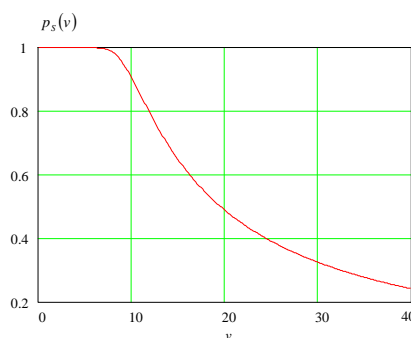


Рисунок 12 – Зависимость вероятности обслуживания от скорости (м/с)

Таким образом, размер буфера, фактически, эквивалентен времени нахождения узла в зоне связи. Среднее значение этого времени определяется скоростью движения узла и средней длиной пути (хорды).

Будем характеризовать эффективность функционирования подвижного узла числом обслуженных узлов WSN за интервал времени t , которое равно

$$n_s(t) = 2Rvt \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\left(1 - \frac{2R\rho v}{\mu}\right) \left(\frac{2R\rho v}{\mu}\right)^{\frac{4R}{v}}}{1 - \left(\frac{2R\rho v}{\mu}\right)^{\frac{4R}{v} + 1}} \right) \quad (12)$$

где: ρ - плотность узлов (узлов/ед. площади); k – некоторый постоянный коэффициент, определяемый эмпирически.

Вид данной функции приведен на рисунке 13.

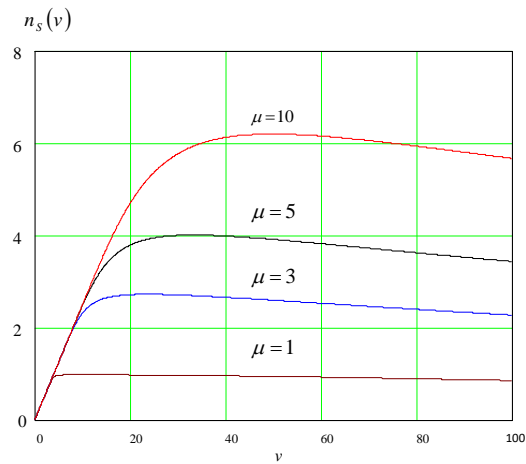


Рисунок 13 – Зависимость числа обслуженных узлов за интервал времени от скорости движения

Для исследования данной зависимости была разработана имитационная модель процесса обслуживания узлов WSN подвижным узлом. Модель представляет собой однофазную СМО с ожиданием, на вход которой поступает простейший поток заявок с интенсивностью, определяемой выражением (11). Время обслуживания заявок подчинено экспоненциальному закону распределения со средней интенсивностью обслуживания $\mu=1$. Подвижный узел имеет радиус связи $R=20$ м. Узел движется в зоне обслуживания, где плотность узлов WSN составляет $0,0025$ узлов/м². Дисциплина обслуживания предполагает, что заявка может ожидать обслуживания в очереди некоторое случайное время τ . По истечении этого времени, если заявка не была обслужена, то она покидает систему и считается потерянной. Величина τ определяется длиной пути узла WSN в зоне подвижного узла и скоростью его движения, согласно (7). При этом длина пути случайна. Результаты моделирования приведены на рисунке 14.

На рисунке 15 приведены результаты моделирования для случая постоянного времени обслуживания.

При постоянном времени обслуживания наблюдается максимум числа обслуженных узлов. Разница результатов для моделей со случайной и постоянной длительностями обслуживания объясняется тем, что в первом случае при росте скорости движения сохраняется вероятность обслуживания узла, так как время обслуживания определенной доли узлов может быть достаточно малым и даже близким к нулю.

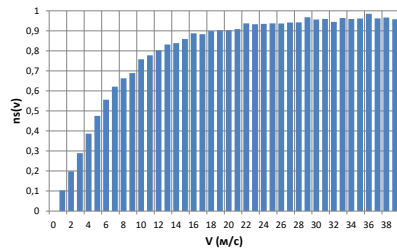


Рисунок 14 – Зависимость числа обслуженных узлов за единицу времени от скорости движения подвижного узла при экспоненциальном времени обслуживания

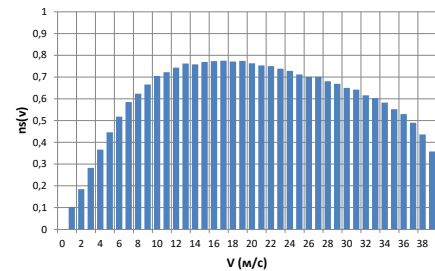


Рисунок 15 – Зависимость числа обслуженных узлов за единицу времени от скорости движения подвижного узла при постоянном времени обслуживания

При постоянной длительности обслуживания с ростом скорости движения узла уменьшается вероятность обслуживания узла, причем при скорости численно равной или превышающей

$$v_0 = 2R \cdot \mu \quad (13)$$

(в данном случае 40 м/с) вероятность обслуживания равна нулю.

Для обработки результатов аналитического моделирования использовался пакет Mathcad, а имитационного – среды Anylogic и Excel.

В заключении приводятся следующие основные результаты диссертационной работы:

1. Анализ развития сетей связи на основе концепции Интернета вещей и эволюции сотовых сетей связи показал, что в настоящее время и в обозримом будущем сети связи можно охарактеризовать как гетерогенные. При этом гетерогенной становится и зона действия базовой станции системы длительной эволюции LTE, что требует модификации известных моделей для анализа и расчета сетей связи.

2. Для рационального распределения ресурсов в зоне базовой станции LTE возможно использовать методы кооперации. В работе проанализированы существующие подходы к кооперации и соответствующие методы с целью анализа их возможностей для продления жизненного цикла беспроводных сенсорных сетей при их нахождении в гетерогенной зоне LTE.

3. Разработана новая модель сенсорной сети с использованием временных мобильных головных узлов, в качестве которых могут выступать терминалы LTE, узлы VANET, квадрокоптеры летающих сенсорных сетей.

4. Определены вероятности доступности головного узла кластера и временного мобильного головного узла. Доказано, что при использовании временного мобильного узла как

головного узла кластера вероятность доступности головного узла беспроводной сенсорной сети может быть увеличена в несколько раз,

5. Процесс кластеризации в беспроводной сенсорной сети связан с расходом энергии, необходимым для передачи сообщений между узлами беспроводной сенсорной сети организации кластера. Выбор продолжительности интервала кластеризации (раунда) влияет на время доставки сообщений в сети и энергопотребление. Оптимальное значение длительности раунда, определяемое минимумом расхода энергии на кластеризацию, определено из условия обеспечения требуемого времени доставки сообщений.

6. Разработана модель обслуживания узлов беспроводной сенсорной сети, отличающаяся от известных тем, что обслуживание этих узлов осуществляется временным мобильным головным узлом и при этом в модели учитываются плотность узлов сети, скорость движения временного мобильного головного узла, его радиус связи.

7. Разработана методика выбора рационального значения скорости движения мобильного узла сети, отличающаяся тем, что мобильный узел используется как временный головной узел кластера беспроводной сенсорной сети, что позволяет увеличить число обслуженных сенсорных узлов за интервал времени.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК

1. Футахи, А.А. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами/ А.А. Футахи, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый //Электросвязь. –2016. – №9. –С. 48–53.
2. Футахи, А.А. Сенсорные сети в гетерогенной зоне системы длительной эволюции / А.А. Футахи, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый, А.В Прокопьев //Электросвязь. – 2015. – №3. – С. 36–39.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

3. Futahi, A. Paramonov, A. Prokopiev, A.Koucheryavy. Ubiquitous Sensor Networks in the Heterogeneous LTE Network. Proceedings of the 17th International Conference on advanced communications, (ICACT), Pyeongchang, Korea, 2015, pp. 28 – 32. (Scopus)
4. Futahi, A.Paramonov, A.Koucheryavy. Wireless Sensor Networks with Temporary Cluster Head Nodes., Proceedings of the 18th International Conference on advanced communications, Pyeongchang, Korea, 2016, pp. 283 – 288. (Scopus)

Публикации в материалах конференций

5. Футахи, А.А. LTE и кооперативные сети/ А.А. Футахи //Труды 67-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов СПбГУТ. – Санкт-Петербург. –28-29 мая 2013. –С. 33–36.

6. Футахи, А.А. Анализ сценариев функционирования кооперативных сетей / А.А. Футахи // Сборник статей III Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», – СПбГУТ. – 25-26 февраля 2014. – С. 369 – 372.

7. Футахи, А.А. Модель построения кооперативных сетей / А.А. Футахи // Труды 69-ой Научно-технической конференции СПбНТОРЭС «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова», на секции “Перспективные технологии на сетях связи общего пользования”. – Апрель 2014, – С. 162 – 163.

8. Футахи, А.А. Кооперация в мобильных сетях / А.А. Футахи // Сборник докладов 3-ей научно-технической школой-семинар «инфокоммуникационные технологии в цифровом мире», – 21-22 ноября 2013, – С. 14 – 16.

В других изданиях

9. Футахи, А.А. LTE и беспроводные сенсорные сети / А.А. Футахи, Е.А. Кучерявый, А.Е. Кучерявый // Мобильные телекоммуникации. – 2012. – №9. – С 38–41.