

На правах рукописи



Аль-Кадами Нассер Ахмед Салех

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2016

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Никульский Игорь Евгеньевич

доктор технических наук, доцент,

ОАО “ЦНТО “Ленинец”, С.-Петербург

Гл. специалист, зам главного конструктора

Андреев Сергей Дмитриевич

кандидат технических наук, Российский

университет дружбы народов, доцент.

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

Защита состоится «16» июня 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, кор.3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Автореферат разослан « 11 » апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.025.04,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Беспроводные сенсорные сети (БСС) рассматривают как одно из самых важных современных направлений развития технологий в двадцать первом веке. В прошедшее десятилетие идея беспроводных сенсорных сетей получила большое признание и в научном мире, и в промышленности во всем мире.

На сегодняшний день беспроводные сенсорные сети *WSNs (Wireless Sensor Networks)* являются основным способом сбора данных для широкого спектра приложений, таких как военные, сельское хозяйство, окружающая среда, транспорт, здоровье и т.д.

Каждый сенсорный узел собирает данные от окружающей среды и передает их к шлюзам или базовым станциям (БС) либо непосредственно, либо через другие сенсорные узлы. Сенсорные узлы, как правило, обладают ограниченными возможностями по электропитанию и его восстановлению. Поэтому, выбор способа организации передачи информации между сенсорным узлом и шлюзами или базовыми станциями является одной из основных научных проблем при создании БСС.

Сенсорная сеть, в последнее время ее часто называют также сенсорным полем, может включать в себя тысячи узлов. В соответствии со спецификациями протокола *Zig Bee* сенсорная сеть может содержать до 64 000 (шестидесяти четырёх тысяч) узлов. БСС имеют ограниченные ресурсы: это ограниченная мощность системы питания, малая память, низкая скорость передачи данных и т.д. Эти ограничения непосредственно влияют на разработку протоколов и алгоритмов, используемых в БСС. Таким образом, разработанные алгоритмы для беспроводных сенсорных сетей должны эффективно работать на очень ограниченных ресурсах аппаратного обеспечения. При этом большую часть времени сенсорные узлы находятся в спящем состоянии, что требует использования для функционирования БСС принципов самоорганизующихся сетей.

Кластеризация оказалась при этом одним из важнейших методов создания БСС. Функционирование кластеризованной БСС во многом зависит от алгоритма выбора головного узла, основные требования к которому заключаются в требованиях по обеспечению максимальной длительности жизненного цикла сети и макси-

мального покрытия. Следует отметить, что в кластерных БСС алгоритм выбора головного узла фактически совпадает с протоколом маршрутизации сообщений.

К настоящему времени разработано достаточно много алгоритмов выбора головного узла, в основном для БСС со стационарными сенсорными узлами. Весомый вклад в разработку принципов построения БСС, а также алгоритмов выбора головного узла внесли А. Е. Кучерявый, А. Салим, В. А. Мочалов, Е. А. Кучерявый, Д. А. Молчанов, П. А. Абакумов, W. Heinzelman, O. Yonis, M. Lindsey, D. Kim.

В то же время, целый ряд проблем, связанных с разработкой эффективных алгоритмов кластеризации для мобильных сетей, отказоустойчивых алгоритмов, еще требует своего решения. Поскольку кластеризация используется для БСС с достаточно высокой плотностью, важной представляется также разработка методики размещения сенсорных узлов, обеспечивающей требуемое покрытие пространства.

В связи с изложенным исследование, направленное на разработку новых алгоритмов выбора головного узла и методики размещения сенсорных узлов для эффективной кластеризации БСС, представляется актуальным.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в разработке новых алгоритмов выбора головного узла в БСС для сетей с мобильными узлами, отказами и разработке методики размещения сенсорных узлов, обеспечивающей требуемое покрытие пространства.

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

1. Анализ современного состояния в области исследований БСС, определение наиболее важных характеристик и структуры беспроводных сенсорных сетей;
2. Анализ существующих алгоритмов маршрутизации, самоорганизации и выбора головного узла кластера в беспроводных сенсорных сетях;
3. Оценка и сравнительный анализ алгоритмов прямой передачи *DT* и кластеризации *LEACH*, *SEP*, *TEEN*, *DEEC* в гомогенной, двухуровневой и многоуровневой гетерогенных сенсорных сетях;
4. Разработка нового адаптивного алгоритма кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами на основе комбинированного критерия прогнозирования и значения пригодности сенсорного узла;

5. Разработка нового отказоустойчивого алгоритма кластеризации для беспроводных сенсорных сетей (*FT-TEEN*);

6. Исследование характеристик покрытия, связности и плотности в двумерных (*2D*) и трехмерных (*3D*) беспроводных сенсорных сетях с целью разработки методики размещения сенсорных узлов, способной обеспечить, по крайней мере, 90% покрытие для *2D* и *3D* БСС;

7. Оценка длительности жизненного цикла сети, периода стабильности и пропускной способности БСС на основе отношения между радиусом покрытия и радиусом дальности связи.

Объект диссертации. Беспроводные сенсорные сети.

Предмет диссертации. Алгоритмы кластеризации и покрытие в беспроводных сенсорных сетях.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих новых научных результатах:

1. Разработан новый адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами под названием *МАСА*, отличающийся комплексным применением известных ранее комбинированного критерия прогнозирования и значения пригодности сенсорного узла для выполнения роли головного, который за счет комплексного использования указанных выше величин обеспечивает большее значение длительности жизненного цикла и увеличение длительности периода стабильности по сравнению с известными алгоритмами.

2. Разработан новый отказоустойчивый алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей под названием *FT-TEEN*; отличающийся от известного алгоритма *TEEN* наличием резервных головных узлов кластера, обнаружением и восстановлением отказов в БСС, что позволяет увеличить число пакетов, успешно полученных как в головных узлах кластеров, так и на базовой станции;

3. Разработана методика размещения сенсорных узлов для двумерных (*2D*) и трехмерных (*3D*) БСС, отличающаяся от известных тем, что обеспечивается, по крайней мере, 90% покрытие пространства в зависимости от соотношения плотности размещения и радиуса действия сенсорного узла R_S .

Личный вклад. Все основные результаты диссертации получены автором лично.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и исследовании нового алгоритма выбора головного узла кластера в БСС с мобильными головными узлами, обеспечивающего большее значение длительности жизненного цикла и увеличение длительности периода стабильности по сравнению с известными алгоритмами, отказоустойчивого алгоритма, использующего резервные головные узлы для увеличения числа пакетов, успешно полученных как в головных узлах кластеров, так и на базовой станции, а также определении методики размещения сенсорных узлов для двумерных и трехмерных БСС, отличающейся от известных тем, что обеспечивается, по крайней мере, 90% покрытие пространства в зависимости от соотношения плотности размещения и радиуса действия сенсорного узла R_s . Практическая ценность работы состоит в возможности использования полученных результатов для планирования и проектирования БСС.

Результаты диссертационной работы используются в СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ по курсам “Современные проблемы науки в области телекоммуникаций” и “Интернет Вещей и самоорганизующиеся сети”.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы современные методы вычислительной геометрии, прогнозирования, имитационного моделирования. В качестве инструментов моделирования использовались программные пакеты *C# Visual.NET* и *MATLAB*, в целях визуализации полученных результатов применялось программное обеспечение *Microsoft Excel*.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами *MACA* обеспечивает большее значение длительности жизненного цикла и увеличение длительности периода стабильности по сравнению с известными алгоритмами (*DCA*, *LEACH-mobile*);
- Отказоустойчивый алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей *FT-TEEN* обеспечивает увеличение числа пакетов, успешно получен-

ных как в головных узлах кластеров, так и на базовой станции по сравнению с базовым алгоритмом *TEEN*;

- Методика размещения сенсорных узлов, обеспечивающая, по крайней мере, 90% покрытие для двумерных (2D) и трехмерных (3D) БСС в зависимости от соотношения плотности размещения и радиуса действия сенсорного узла R_S .

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования и широким обсуждением материалов диссертации на Международных и Всероссийских конференциях.

Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, докладывались и обсуждались на 69-й и 70-й конференциях СПбНТОРЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2014, 2015); на 17-ой Международной конференции по современным технологиям связи (*The 17th IEEE International Conference on Advanced Communication Technology – ICACT 2015, Korea, Phoenix Park, 1-3 June 2015*); на 15-ой международной конференции по проводным/беспроводным сетям связи следующего поколения «*15th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN*» (*St.-Petersburg, Russia, 2015*); на IV и V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2015, 2016), а также на заседаниях кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации. Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках научно-технических конференций, в том числе международных, а также в журналах отрасли. Всего опубликовано 9 печатных работ, из них 3 работы в зарубежных научно-технических сборниках (*Scopus*), 3 работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 статья в журнале, включенном в РИНЦ, и тезисы докладов в количестве 2 в материалах научных конференций.

Объем и структура. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, словарь терминов, список литературы,

включающий 96 наименований на русском и английском языке, список иллюстративного материала и 3 приложения. Основные результаты изложены на 164 страницах, содержат 57 рисунков, 9 таблиц, объем приложений составляет 39 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, формируются цель и задачи работы.

В первой главе диссертационной работы проанализированы основные характеристики современных БСС и существующие работы в предметной области. Приводится информация о концепции Интернета Вещей (*IoT*), архитектуре и приложениях беспроводных сенсорных сетей, рассматриваются классификация беспроводных сенсорных сетей, проблемы проектирования и маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, анализируются особенности гомогенных и гетерогенных БСС, методы кластеризации.

Во второй главе проводится оценка и сравнительный анализ широко используемых при построении БСС алгоритмов маршрутизации и самоорганизации для беспроводных сенсорных сетей со стационарными узлами на плоскости. Сравнение алгоритмов осуществляется по результатам моделирования на *MATLAB*. В качестве показателей для сравнения используются длительность стабильного периода функционирования сенсорной сети и остаточная энергия. Анализируются алгоритм прямой передачи *DT* и наиболее известные алгоритмы кластеризации *LEACH* (*Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy*), *SEP* (*Stable Election Protocol*), *DEEC* (*Distributed Energy Efficient Clustering*) и *TEEN* (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol*). Сравнение алгоритмов производится для гомогенной, двухуровневой и многоуровневой гетерогенных сенсорных сетей.

При сравнительном анализе использовались несколько сценариев построения БСС.

- **Первый сценарий.** В первом сценарии сравнивались алгоритм прямой передачи (*DT*) и алгоритмы иерархической маршрутизации *LEACH* и *TEEN* для гомогенных (однородных) сенсорных сетей.

- **Второй сценарий.** В этом сценарии рассматривалась гетерогенная сенсорная сеть, в которой есть два типа узлов – обычные и продвинутые. Предлагается новая модель, отличающаяся от известных тем, что начальная энергия для продвинутых узлов в два раза больше, чем для обычных. При этом их число составляет 10% от общего числа узлов на сенсорном поле. Сравнивается эффективность применения алгоритмов *DT*, *LEACH*, *TEEN* и *SEP* для модели гетерогенной сети.

- **Третий сценарий.** В этом сценарии рассматривались многоуровневые по возможным энергетическим характеристикам сенсорных узлов гетерогенные сети. При этом гетерогенная сенсорная сеть содержит сенсорные узлы трех уровней: обычные, продвинутые и суперузлы. Каждый узел имеет свою первичную энергию, значение первичной энергии изменяется в пределах от 0,1 до 1дж. Сравнивается эффективность применения алгоритмов *DT*, *LEACH*, *TEEN* и *DEEC* для этой модели гетерогенной сети. На рисунке 1 показана зависимость остаточной энергии сети от числа раундов для всех сценариев.

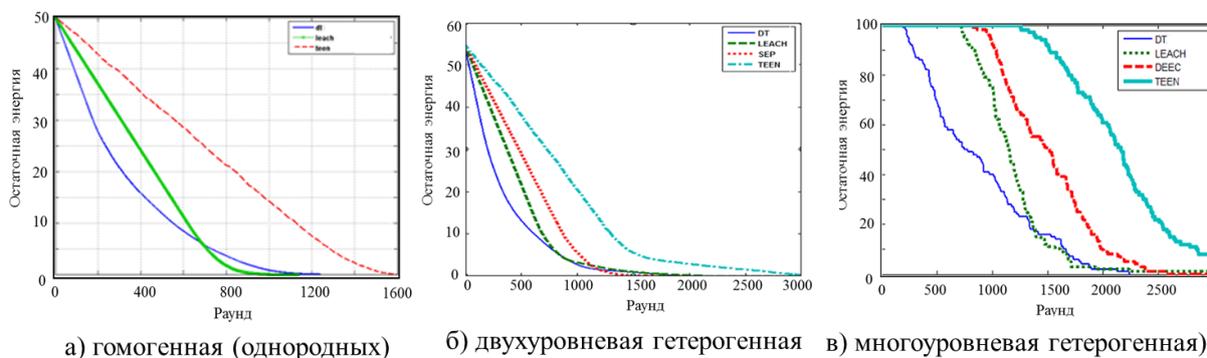


Рис. 1 – Остаточная энергия

Анализ результатов моделирования показывает, что отсутствие кластеризации при использовании алгоритма прямой передачи приводит к тому, что длительность жизненного цикла БСС может уменьшиться более, чем в 7 раз по сравнению с применением алгоритмов кластеризации. Алгоритм *TEEN* превосходит по эффективности все алгоритмы кластеризации в исследуемых случаях, и рекомендуется к использованию как в гомогенных, так и в гетерогенных БСС. Отметим, что по длительности периода стабильности алгоритм *TEEN* также превосходит все рассмотренные алгоритмы.

В третьей главе разработан новый адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами под названием *MACA (Mobility Adaptive Clustering Algorithm)*.

Множество исследовательских работ посвящено проблемам БСС со стационарными узлами. Тем не менее, передовые технологии для Интернета Вещей включают в себя применение более сложных приложений, которые требуют мобильности их узлов.

Кластерная архитектура нашла применение и в мобильных сенсорных сетях (*MWSNs*), поэтому поиск наилучших вариантов организации кластера и выбор головного узла для *MWSN* является сегодня актуальной задачей.

Разработанный алгоритм основан на сочетании лучших свойств двух известных существующих алгоритмов – *DCA (Distributed Clustering Algorithm)* и *MBC (Mobility-Based Clustering)*.

Как и большинство существующих алгоритмов, разработанный алгоритм *MACA* содержит две фазы: фазу формирования кластеров, когда создается множество кластеров и расписание *TDMA*, и фазу стационарного состояния, когда головные узлы собирают информацию и передают их на шлюз или базовую станцию. В разработанном алгоритме кластеризации мобильный сенсорный узел выбирает себя головным узлом кластера на основе простого точечного предиктора *SPP (Single Point Predictor)* для комбинированного критерия прогнозирования.

Комбинированный критерий прогнозирования включает критерии связности, покрытия, мобильности и остаточной энергии. Комбинированный критерий прогнозирования $CC(s_i)$ для БСУ S_i в момент времени t определяется по формуле:

$$CC(s_i) = \alpha \times ConC(s_i) + \beta \times CovC(s_i) + \frac{\gamma}{1 + MC(s_i)} + \zeta \times REC(s_i) \quad (1)$$

$$\text{В (1) } \alpha + \beta + \gamma + \zeta = 1.$$

Известно, что простой предиктор *SPP* обеспечивает наибольший по длительности жизненный цикл сенсорной сети. Комбинированный критерий прогнозирования (*PCC*) должен быть предсказан в текущее время в соответствии с историей этого критерия;

$$HCC = [(CC_1, t_1), (CC_2, t_2), \dots, (CC_n, t_n)] \quad (2)$$

где $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Простой точечный предиктор *SPP* (*Single Point Predictor*) всегда предсказывает следующее значение как предыдущую величину *HCC*:

$$PCC = SPP(t_c) = CC_n \quad (3)$$

Другие узлы представляют собой члены кластера, определяемые на основе некоторого значения, указывающего на их пригодность для подключения к конкретному головному узлу.

$$W_{ij} = a \times \frac{E_{j-current}}{E_{max} \cdot N_{j-current}} + b \times \left(1 - \frac{d_{ij}}{R_{tran}}\right) + c \times \frac{\Delta t_{ij}}{t_{frame}} \quad (4)$$

Моделирование было проведено на языке C#.NET с использованием следующих численных характеристик (типовых) сенсорной сети. БСУ случайным образом распределены на плоскости 400м*400 м, и число сенсоров изменяется от 200 до 400 с шагом 50.

Алгоритм *MACA* сравнивается с алгоритмами *LEACH-M* и *DCA* по длительности жизненного цикла сенсорной сети, длительности периода стабильности и по числу успешно переданных пакетов.

На рисунке 2 приведены результаты моделирования для случая, когда в живых остается 40% БСУ. Из рисунка видно, что во всем диапазоне изменения размера сети длительность жизненного цикла сенсорной сети при использовании алгоритма *MACA* существенно выше, чем для *LEACH-M* и *DCA*.

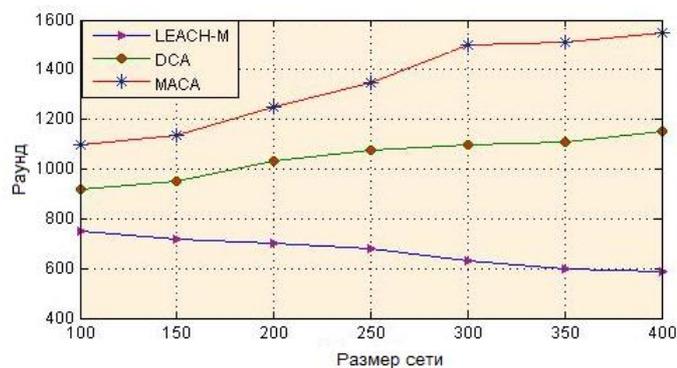


Рис. 2 – Длительность жизненного цикла для *MACA*, *DCA* и *LEACH-M*

Длительность интервала времени от начала функционирования сети до гибели первого БСУ (*FND*) называют периодом стабильности. На рисунке 3 приведены

сравнительные характеристики периода стабильности для алгоритмов *MACA* и *DCA*. Алгоритм *LEACH* не выдерживает конкуренции с этими алгоритмами.

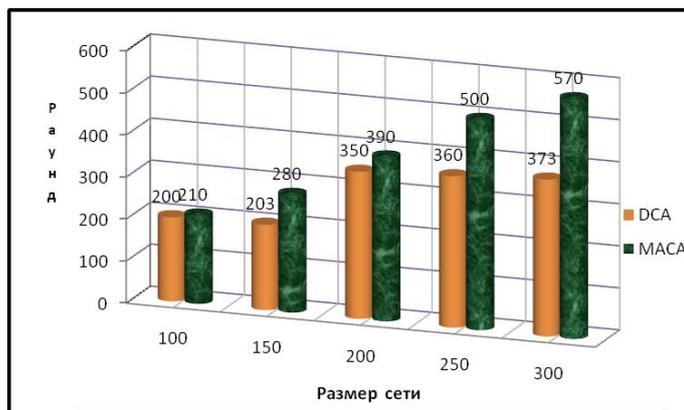


Рис. 3 – Период стабильности для *MACA* и *DCA*

Как видно из результатов моделирования, период стабильности для нового алгоритма кластеризации больше, чем для алгоритма *DCA*. Результаты моделирования также показывают, что период стабильности для обоих алгоритмов возрастает с увеличением размера сети.

С учетом того, что разработанный алгоритм *MACA* превосходит по длительности жизненного цикла и периода стабильности алгоритм *DCA*, этот алгоритм рекомендуется к использованию, в том числе для наземных фрагментов летающих сенсорных сетей.

Четвёртая глава посвящена разработке отказоустойчивого алгоритма кластеризации для беспроводных сенсорных сетей.

В беспроводных сенсорных сетях (БСС) с кластерной архитектурой головные узлы кластеров играют ключевую роль в процессе функционирования сети и маршрутизации данных. Естественно, любые сбои в функционировании этих важных узлов влияют на качество услуг и надежность сети и могут привести даже к отказу сети в целом. Отказоустойчивость представляет собой одну из ключевых проблем в области проектирования и эксплуатации беспроводных сенсорных сетей БСС. Отказ некоторых узлов в БСС практически неизбежен по следующим причинам: отказ аппаратных средств, энергетическое истощение, сбой ПО, ошибки связи, вредоносная атака и т.д.

Предложенный алгоритм представляет собой модифицированный вариант алгоритма *TEEN*, вводит резервный механизм для кластеризации, обнаружение и восстановление ошибок и состоит из трех фаз.

В фазе формирования кластера выбираются головные и резервные головные узлы кластера. БСУ в сети выбирает наиболее подходящий головной узел кластера для присоединения на основе мощности получаемого сигнала *RSS (Received Signal Strength)* от головного узла. Далее головной узел *CH* находит среди членов кластера такой БСУ, у которого остаточная энергия максимальна и определяет его как резервный головной узел *sub-CH* и передает эту информацию членам кластера.

Предложенный алгоритм *FT-TEEN* обнаруживает и восстанавливает ошибки согласно следующему алгоритму:

Шаг 1. Инициализация *CH* и *sub-CH* в каждом кластере.

Шаг 2. Если ответ не приходит от *CH* в пределах заданного временного интервала, тогда

Шаг 3. Головной узел *CH* отмечается как неисправный и *sub-CH* становится головным узлом в кластере.

Шаг 4. Если ответ не приходит от *sub-CH* в пределах заданного временного интервала,

Шаг 5. *Sub-CH* отмечается как неисправный и находится новый резервный головной узел из членов кластера.

На рисунке 4 изображена блок-схема формирования кластера для разработанного алгоритма, а на рисунке 5 блок-схема передачи данных, обнаружения и восстановления ошибок для разработанного алгоритма.

Для сравнения характеристик разработанного алгоритма *FT-TEEN* с базовым алгоритмом *TEEN* было проведено моделирование в среде *MATLAB*. Сравнение алгоритмов проводилось по числу успешно переданных пакетов между членами кластера и *CH*, а также между *CH* и БС. При моделировании рассматривалось пуассоновское поле со 100 сенсорными узлами площадью $100\text{м} \times 100\text{ м}$. Предполагалось, что БС расположена за пределами поля с координатами $x = 130$, $y = 50$.



Рис. 4 – Блок-схема формирования кластера для разработанного алгоритма

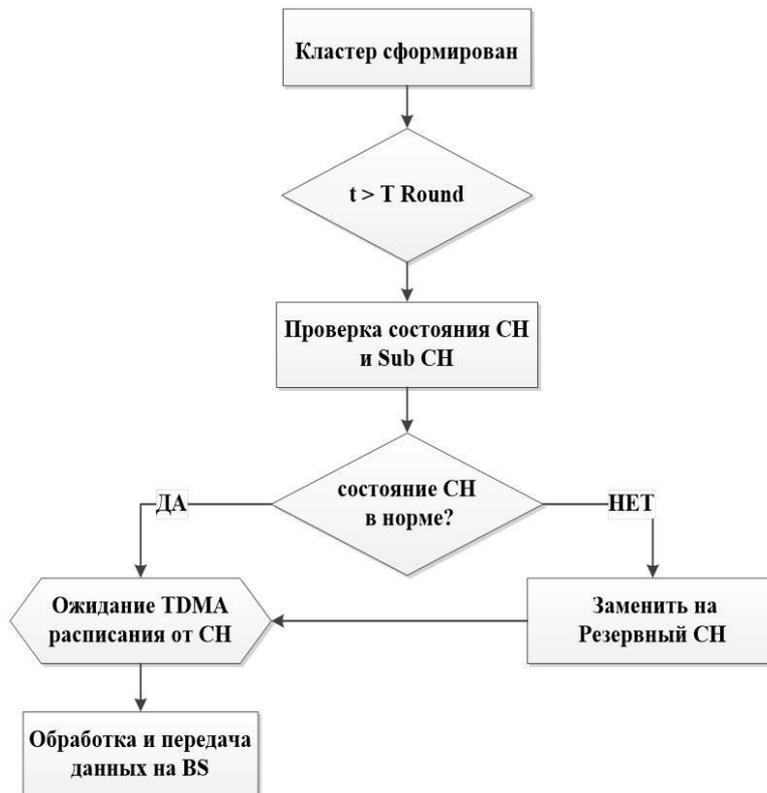


Рис. 5 – Блок-схема передачи данных, обнаружения и восстановления ошибок для разработанного алгоритма

На рис. 6 и 7 показано число успешно переданных пакетов от членов кластера на *CH* и от *CH* на БС соответственно в течение жизненного цикла сенсорной сети при различных вероятностях ошибки.

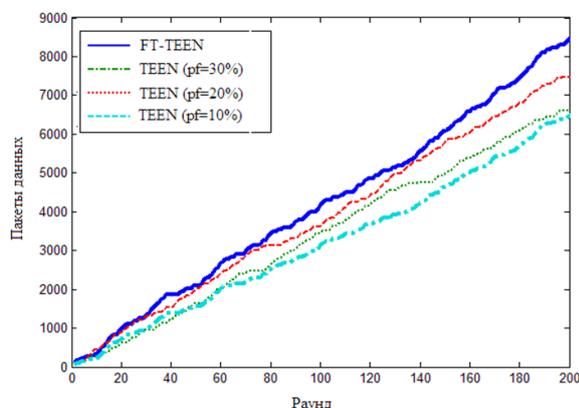


Рис.6— Число успешно переданных пакетов от членов кластера на *CH*

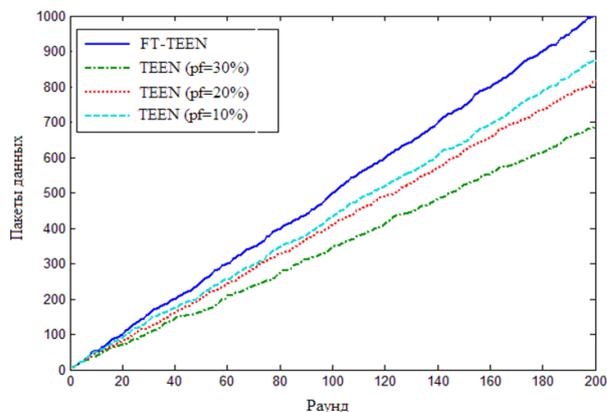


Рис.7— Число успешно переданных пакетов от *CH* на базовую станцию

Результаты моделирования для всего жизненного цикла сети сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования для жизненного цикла сети

Вероятность ошибки P_f , %	<i>TEEN</i>		<i>FT-TEEN</i>		Доля улучшения для переданных пакетов %	
	Без обнаружения сбоев и восстановления, успешно переданные пакеты		С обнаружением сбоев и восстановлением, успешно переданные пакеты			
	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>	в <i>CHs</i>	в <i>BS</i>
10	7500	876	8409	1005	12	15
20	6655	822	8409	1005	26	22
30	6405	692	8409	1005	31	45

Как видим, разработанный алгоритм обеспечивает увеличение числа успешно переданных пакетов как от членов кластера к *CH*, так и от *CH* к базовой станции по сравнению с алгоритмом *TEEN*.

Разработанный алгоритм *FT-TEEN* обеспечивает толерантность к значению вероятности ошибки, в то время как для базового алгоритма *TEEN* число успешно переданных пакетов существенно снижается с ростом вероятности ошибки в рассмотренных пределах.

В пятой главе исследуются покрытие, связность и плотность в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях.

Несмотря на то, что большинство существующих работ в области беспроводных сенсорных сетей (БСС) в настоящее время посвящены двумерному пространству ($2D$), на самом деле такие сети работают в трехмерном пространстве ($3D$), особенно с учетом появления новых приложений, таких как летающие сенсорные сети. Переход от двумерного к трехмерному пространству порождает множество новых проблем в связи с иной топологией сети. Требуются новые подходы к оценке таких характеристик БСС как покрытие, связность и плотность. Исходя из сказанного, в настоящей главе исследуются характеристики плотности и связности для БСС с целью определения такой методики размещения сенсорных узлов, чтобы возможно было обеспечить, по крайней мере, 90% покрытие для двумерных ($2D$) и трехмерных ($3D$) БСС. При этом оцениваются также длительность жизненного цикла сети, период стабильности и пропускная способность сети на основе отношения между радиусом покрытия (R_s) и радиусом дальности связи (R_c). Результаты могут быть использованы при планировании как БСС, размещенных на плоскости, в трехмерном пространстве, так и летающих сенсорных сетей.

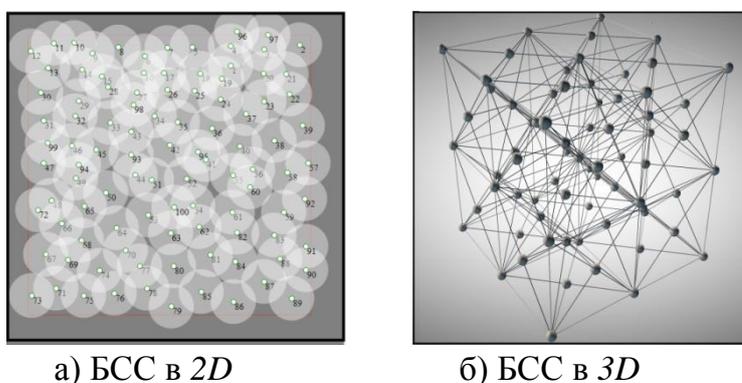


Рис. 8 – БСС в двумерном и трехмерном пространствах

Таким образом, цель главы - определение такой стратегии размещения БСС (плотности и связности), при которой можно обеспечить 90% и более покрытие пространства как для двумерных, так и трехмерных БСС.

Рассмотрим соотношение между радиусом покрытия сенсорного узла, долей покрытия и плотностью в $2D$ и $3D$ БСС.

- **Двумерная БСС.**

Предположим, что n сенсорных узлов случайным образом распределены в $2D$ плоскости и зона покрытия сенсорного узла представляет собой диск с радиусом R_s , площадь которого:

$$S = \pi R_s^2 \quad (5)$$

требуемая плотность БСС:

$$\rho = \frac{-\log(1-c)}{\pi r^2} \Leftrightarrow R_s = \sqrt{\frac{-\log(1-c)}{\pi \rho}} = \sqrt{\frac{-\log(1-c)S}{\pi n}} \quad (6)$$

- **Трехмерная БСС.**

Сенсорные узлы $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, случайным образом распределены в трехмерной области V . Каждый сенсорный узел S_i , $i=1..n$, имеет координаты (x_i, y_i, z_i) в объеме V и радиус покрытия R_s . Таким образом, зона покрытия для S_i может быть представлена сферой с центром в (x_i, y_i, z_i) и радиусом R_s :

$$V_s = \frac{4}{3} \pi R_s^3 \quad (7)$$

Доля покрытия C определяется аналогично:

$$c = 1 - e^{-\rho V_s} \quad (8)$$

Плотность узлов может быть определена аналогично приведенному выше случаю. В общем случае необходимая плотность БСС:

$$\rho = \frac{-\log(1-c)}{\frac{4}{3}\pi R_s^3} \Leftrightarrow R_s = \left[\frac{-\log(1-c)}{\frac{4}{3}\pi \rho} \right]^{1/3} = \left[\frac{-\log(1-c)V_s}{\frac{4}{3}\pi n} \right]^{1/3}, \quad (9)$$

где C – доля покрытия; ρ – плотность; R_s – радиус зоны покрытия сенсорным узлом.

На рисунке 9 представлены сравнительные характеристики для $2D$ и $3D$ БСС. Как видно из рисунка 9, размерность сенсорного поля влияет на необходимую плотность БСС для обеспечения заданной доли покрытия. Причем, при прочих равных условиях для трехмерных БСС необходимая плотность сенсорных узлов больше, чем для двумерных.

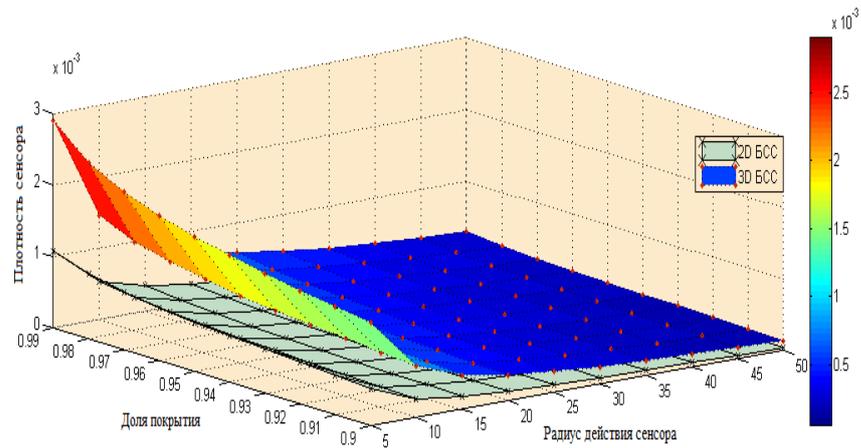


Рис. 9 – Сравнительные характеристики для 2D и 3D БСС

На рисунке 10 приведено сравнение числа близлежащих узлов, т.е. узлов, находящихся на расстоянии меньше $2R_s$, для 2D и 3D БСС. Поскольку необходимая плотность размещения сенсорных узлов для обеспечения заданной доли покрытия для 3D существенно выше, чем для 2D БСС, то и число близлежащих узлов для 3D БСС также намного больше, чем для 2D.

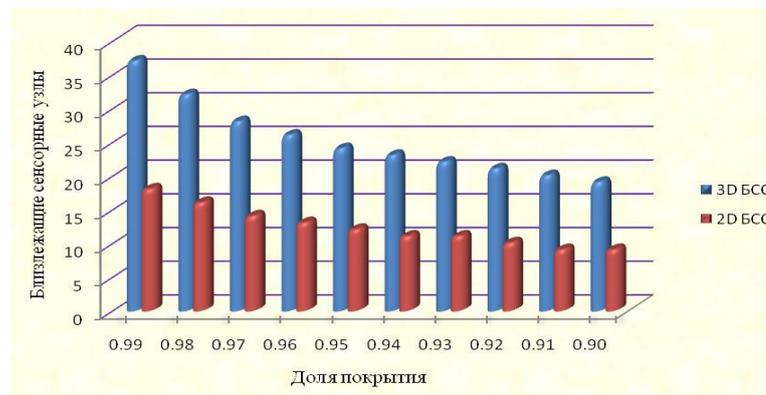


Рис. 10 – Соотношения между долей покрытия C и числом близлежащих сенсорных узлов, находящихся на расстоянии меньше $2R_s$, при случайном размещении узлов для 2D и 3D БСС

Соотношение между радиусом покрытия и радиусом связи R_c/R_s является очень важным фактором обеспечения непрерывного функционирования БСС до гибели последнего БСС. Для того чтобы изучить влияние R_c/R_s на производительность и срок службы сети рассмотрим возможные соотношения между радиусом покрытия и радиусом связи для 2D БСС:

- радиус связи, по крайней мере, в два раза больше радиуса покрытия $R_c \geq 2R_s$;
- $R_c = R_s = 30\text{м}$;
- $R_c < R_s$.

Для анализа и сравнения указанных вариантов проводилось моделирование с использованием *C#* и *VB.NET*. Оценивалась производительность сети (период стабильности, длительность жизненного цикла и принятых пакетов на базовой станции, расположенной вне территории сети) на основе соотношения R_c / R_s .

Модель сети представляет собой 200 БСУ, равномерно размещенных на плоскости $400\text{м} * 400\text{м}$. Предполагается, что БС фиксирована и расположена вне сети (150м, 150м), сенсорный узел функционирует с фиксированной скоростью передачи и всегда имеет данные для передачи на БС.

Таблица 2 – Влияние отношение R_c / R_s на производительность сети

Отношение R_c / R_s	Первый узел погиб в раунде	40% процентов узлов гибнут за n раундов	Число принятых пакетов
$R_c \geq 2R_s$	140	1200	1525
$R_c = R_s$	70	460	790
$R_c < R_s$	67	370	770

Как видно из таблицы, 40% узлов во втором и третьем случаях гибнут за меньшее время, чем в первом. Однако сети продолжают работать, поскольку есть покрытие и связность между узлами. Это означает, что узлы в сетях еще имеют необходимую энергию. Проблема заключается в возможности соединения между ними, и решить ее можно с помощью дополнительной БС.

Как видно из результатов моделирования, для обеспечения необходимой связности между узлами радиус связи должен быть, по крайней мере, в два раза больше радиуса покрытия в двумерных БСС. В трехмерных БСС существует множество стратегий для размещения узлов, например, шестиугольная призма, додекаэдр или октаэдр. Для куба, в котором расстояние между любыми двумя соседними узлами равно $2R_s / \sqrt{3}$, радиус связи должен быть не менее $1,547R_s$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведённые в диссертационной работе, позволили получить следующие основные результаты:

1. Анализ современного состояния в области исследований БСС, определение наиболее важных характеристик и структуры беспроводных сенсорных сетей показывают, что саморегулирующийся характер, особые условия по энергетической эффективности, устойчивость к отказам и большое значение числа узлов в БСС требуют разработки специфических алгоритмов маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей.

2. Анализ существующих алгоритмов маршрутизации, самоорганизации и выбора головного узла кластера в беспроводных сенсорных сетях показывает, что требуется разработка новых эффективных алгоритмов кластеризации для мобильных и отказоустойчивых беспроводных сенсорных сетей.

3. Сравнительный анализ алгоритмов *DT*, *LEACH*, *SEP*, *DEEC*, *TEEN* показывает что *LEACH* алгоритм - крайне эффективный протокол для гомогенных БСС. Он помогает снизить энергозатраты в 7 раз по сравнению с прямым взаимодействием сенсорных узлов, а алгоритм *TEEN* превосходит по длительности периода стабильности и остаточной энергии все рассмотренные алгоритмы и рекомендуется к использованию как в гомогенных, так и в гетерогенных БСС.

4. На основе сочетания лучших свойств двух известных существующих алгоритмов – *DCA* и *MBC*, разработан новый адаптивный алгоритм кластеризации для БСС с мобильными узлами *MACA* (*Mobility Adaptive Clustering Algorithm*).

5. В разработанном алгоритме кластеризации мобильный сенсорный узел выбирает себя головным узлом кластера на основе простого точечного предиктора *SPP* (*Single Point Predictor*) для комбинированного критерия прогнозирования (алгоритм *DCA*). Другие узлы представляют собой члены кластера, определяемые на основе некоторого значения, указывающего на их пригодность для подключения к конкретному головному узлу (алгоритм *MBC*).

6. Сравнение предложенного в диссертации алгоритма *MACA* на основе моделирования в системе *C#. NET* показало, что новый алгоритм по длительности жизненного цикла намного превосходит алгоритм *DCA*, который, в свою очередь, существенно превосходит *LEACH-M*. Алгоритм *MACA* превосходит алгоритм *DCA*

также по длительности периода стабильности, а по числу успешно переданных пакетов оба алгоритма приблизительно равны.

7. На основе иерархического алгоритма кластеризации *TEEN* разработан новый отказоустойчивый алгоритм кластеризации для БСС *FT-TEEN*.

8. Разработанный алгоритм обеспечивает увеличение числа успешно переданных пакетов как от членов кластера к *CH*, так и от *CH* к базовой станции по сравнению с алгоритмом *TEEN*.

9. Разработанный алгоритм *FT-TEEN* обеспечивает толерантность к значению вероятности ошибки, в то время как для базового алгоритма *TEEN* число успешно переданных пакетов существенно снижается с ростом вероятности ошибки в рассмотренных пределах.

10. Размерность сенсорного поля существенно влияет на необходимую плотность БСУ для обеспечения заданной доли покрытия. При этом для трехмерных БСС необходимая плотность БСУ больше, чем для двумерных. Число близлежащих узлов для *3D* БСС также значимо больше, чем для *2D* БСС. При планировании БСС разработанная методика размещения БСУ позволяет обеспечить, по крайней мере, 90% покрытие для двумерных и трехмерных БСС.

11. Для обеспечения необходимой связности между узлами радиус связи должен быть, по крайней мере, в два раза больше радиуса покрытия в *2D* БСС.

12. В трехмерных БСС существует множество стратегий для размещения узлов, например, шестиугольная призма, додекаэдр или октаэдр. Для куба, где расстояние между любыми двумя соседними узлами составляет $2R_s/\sqrt{3}$, радиус связи должен быть не менее $1,547R_s$.

ПУБЛИКАЦИИ

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

1. Аль-Кадами Нассер, А.Е.Кучерявый. " **Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами**" // Электросвязь, №3. 2015. – с. 22-26.

2. Аль-Кадами Нассер, А.Е.Кучерявый " **Отказоустойчивый алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей**" // Электросвязь, №3, 2016. – с. 74-80.

3. Аль-Кадами Нассер, А.Е.Кучерявый. **"Покрытие, связность и плотность в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях"** // Электросвязь, №9, 2015 – с. 6-10.

Научные статьи, индексируемые в международных базах данных (Scopus):

4. Nasser AL-Qadami, Inas Laila, Andrey Koucheryavy, Ahmad Saker Ahmad. **"Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes"** / International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT 2015), 1-3 June 2015, Phoenix Park, Korea, ISBN 978-89-968650-4-9. –С.121-126.

5. Nasser Al-Qadami and Andrey Koucheryavy. **"Fault-Tolerance Algorithm in Wireless Sensor Networks"** // "Infocommunications Journal", Hungary, ISSN 2061-2079. №4, 2015–С.28-33.

6. Al-Qadami Nasser and Andrey Koucheryavy. **"Coverage & Connectivity and Density criteria in 2D and 3D Wireless Sensor Networks"** // The 15th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN/ ruSMART 2015, St. Petersburg, Russia, August 26-26, 2015. Proceeding, 9247 LNCS, PP. 319-328.

Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ:

7. Аль-Кадами Н.А. **"Оценка и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации для гомогенных и гетерогенных беспроводных сенсорных сетей"**, [Электронный ресурс] // Научное рецензируемое издание электронный научный журнал - ВЫПУСК 4(8)-2014 (TELECOM IT) – УДК. 621.391, С. 4–22 , <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>.

Опубликованные доклады (тезисы докладов) в материалах научных конференций:

8. Аль-Кадами Нассер, А.Е.Кучерявый - **Алгоритм выбора головного узла в кластерных беспроводных сетях с мобильными узлами** // 69-я Научно-техническая конференция СПБНТОРЭС «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова»: труды конференции, СПб., 17-25 апреля 2014. –С.166–167.

9. Аль-Кадами Нассер, А.Е.Кучерявый. **Критерии покрытия, связности и плотности в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях** // 70-я Научно-техническая конференция СПБНТОРЭС «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова»: труды конференции, СПб., 21–29 апреля 2015 г. – С.205-206.

Подписано в печать 04.04.2016 г

Формат 60x84 1/16. Печ. л 1,0. Тираж 100 экз.

Издательство Владимирского государственного университета имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

600000, Владимир, ул. Горького, 87
