

На правах рукописи



Голубничая Екатерина Юрьевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ КЛАСТЕРНЫХ
СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ), г. Самара, на кафедре «Сети и системы связи».

Научный руководитель:

ЛИХТЦИНДЕР Борис Яковлевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

КОЗЛОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы»;

ДЕАРТ Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», доцент кафедры «Сети связи и системы коммутации».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 03.02.2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 55.2.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ПГУТИ https://www.psuti.ru/ru/science/dissertation_councils/announcements

Автореферат разослан «___» декабря 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 55.2.003.02

доктор технических наук,

доцент



Гребешков Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Тенденции развития современного информационного общества в направлении реализации концепции Интернета вещей, обуславливают стремительное развитие ее технологической основы – беспроводных сенсорных сетей (БСС). Действительно, анализируя основные этапы истории развития сенсорных сетей, которая по официальным данным начинается в 1950-х годах с реализации США гидроакустической системы слежения за подводными лодками (Sound Surveillance System, SOSUS), можно заметить, что за прошедшее десятилетие произошел большой скачок вперед в эволюции развития БСС. Безусловно, такой успех в развитии информационно-измерительных распределенных сетей (в том числе БСС), обусловлен и прогрессивным развитием технологии микроэлектромеханических систем. Указанная технология позволяет на одной микросхеме объединять несколько «крошечных» датчиков, тем самым обеспечивая малогабаритным сенсорным узлам (СУ) многофункциональность и экономическую оправданность их использования. Функциональные возможности таких СУ позволяют реализовать различные системы для управления процессами и контроля окружающей среды. Что, представляет несомненный интерес в наш век высоких технологий, когда человек стремится максимально автоматизировать процессы в своей деятельности.

Однако, несмотря на такие важные свойства БСС, как возможность самоорганизации и низкое энергопотребление СУ, сегодня в БСС по-прежнему актуальны проблемы, вызванные ограниченностью энергии аккумуляторных батарей СУ и ограничениями на время доставки данных для приложений реального времени. Поэтому одной из насущных задач является определение основных источников энергетических затрат и их последующее рациональное использование. При этом, как показывает практика, львиная доля энергетических затрат приходится вовсе не на выполнение основной функции СУ – детектирование данных, а на прослушивание эфира и осуществление функций маршрутизаторов.

Обозначенные выше проблемы, прежде всего, обусловлены использованием беспроводных каналов передачи, и во многом определяются эффективностью применяемых алгоритмов множественного доступа (Medium Access Control, MAC) и алгоритмов доставки двухадресных пакетов данных от начального отправителя (НО) до конечного получателя (КП) посредством ретрансляций промежуточными отправителями (ПО). Таким образом, комплексное

решение указанных проблем состоит в обеспечении эффективности доставки потоковых данных СУ, что во многом определяется применяемым алгоритмом многошаговой маршрутизации двухадресных пакетов данных, в том числе методом МАС. В этой связи исследования, направленные на разработку эффективных подходов совместного решения задач связанных с доступом к каналным ресурсам и маршрутизацией данных в БСС, несомненно, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. До недавнего времени вопросами исследования характеристик и разработкой различных методов и алгоритмов оптимизации функционирования БСС занимались преимущественно зарубежные ученые, но в настоящее время исследованиями БСС активно занимаются и многие отечественные ученые. Так, значительных успехов достигли представители научной школы Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, которые на протяжении уже практически двух десятилетий активно занимаются исследованием и разработкой различных алгоритмов повышающих эффективность функционирования БСС. Здесь можно выделить имеющие значительные теоретические и практические результаты научные исследования Кучерявого А.Е., Киричка Р.В., Прокопьева А.В., Мутханна А.С., Парамонова А.И., Окуновой Д.В. и др.

Вопросы маршрутизации данных как в проводных, так и в беспроводных сетях всегда являлись одной из важнейших тем исследовательских работ. В БСС данная тематика приобретает еще большую актуальность и интерес со стороны ученых, поскольку от эффективности многошаговой маршрутизации в целом и зависит эффективность работы всей БСС. Существенный вклад в решение задач связанных с эффективной маршрутизацией данных в БСС внесли такие ученые как Аль-Кадами Н.А., Аурениус Ю.К., Баскаков С.С., Воронин И.В., Дугаев Д.А., Линский Е.М., Махров С.С., Мутханна А.С., Тимофеева С.В., Хундонугбо Э.Ф., Heinzelman W. и др. В указанных работах был произведен сравнительный анализ известных алгоритмов маршрутизации, исследована эффективность работы известных протоколов в зависимости плотности СУ, а также предложены методы оптимизации алгоритмов и метрик маршрутизации с целью выбора оптимальных маршрутов передачи данных, увеличения вероятности надежной доставки данных, продления времени жизни сети. В основу предлагаемых данными авторами идей были заложены принципы выбора оптимального

маршрута путем определения расстояния между узлами на основе числа переходов, остаточной энергии узлов в текущий момент времени, коэффициента потерь пакетов и уровня беспроводного сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI), маршрутизации по виртуальным координатам СУ, многопутевой маршрутизации, адаптивной маршрутизации с применением теории обучения с подкреплением.

Результаты научных исследований, касающиеся проблемы множественного доступа к среде передачи, в частности предотвращения коллизий при приемопередаче данных, приведены в довольно большом числе работ ученых, среди которых можно отметить Бакина Е.А., Евсеева Г.С., Жевак А.В., Ergen S.C., Varaiya P., Koubaa A. и др. Однако ни одно из предлагаемых в этих работах решений не предполагает использование детерминированной структуры цикла TDMA (Time Division Multiple Access) и гарантированных временных слотов (Guaranteed Time Slot, GTS) суперкадра стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee для реализации процесса маршрутизации, а предполагают лишь использование выделенных временных интервалов (слотов) для предотвращения коллизий при приемопередаче данных. В разработанном алгоритме детерминированная структура цикла TDMA, позволяет GTS (микрослотам суперслота в цикле TDMA) выполнять функции «портов», которые по аналогии с проводными сетями, используются в процессе маршрутизации данных согласно построенному связующему дереву сети (Spanning Tree Network, STN) в рамках работы протокола STP (Spanning Tree Protocol).

Таким образом, до настоящего времени не было уделено должного внимания вопросам, посвященным совместному решению задач по разработке и исследованию алгоритмов многошаговой маршрутизации двухадресных пакетов данных и методов множественного доступа к среде передачи.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются беспроводные сенсорные сети. Предметом исследования являются процессы взаимодействия головных узлов кластеров (ГУК) в рамках многошаговой маршрутизации двухадресных пакетов данных в кластерных БСС со стационарными СУ.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование эффективного алгоритма обмена данными в кластерных БСС на основе подхода совместного решения задач доступа к каналному ресурсу и маршрутизации двухадресных пакетов.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

- провести анализ современного состояния научных исследований и практических результатов в области БСС, определить актуальные проблемы, характерные особенности функционирования БСС;

- провести анализ достоинств и недостатков известных методов маршрутизации в БСС, в том числе методов доступа к среде передачи данных, применяемых в процессе маршрутизации;

- разработать специализированную метрическую функцию для поиска оптимального маршрута межкластерного взаимодействия в БСС со стационарными СУ и управляемой событиями моделью генерации данных, позволяющую более точно оценивать качество маршрута в БСС;

- разработать метод распределения ресурсов детерминированного цикла TDMA, который позволит предотвратить коллизии суперкадров IEEE 802.15.4, а также увеличить оперативность доставки данных и период стабильности сети;

- разработать новый алгоритм маршрутизации двухадресных пакетов в рамках межкластерного взаимодействия на основе детерминированного расписания доступа к среде передачи данных, позволяющего удерживать на гарантированном уровне величину временной задержки доставки данных;

- провести оценку эффективности разработанных алгоритмов посредством имитационного моделирования.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработан алгоритм поиска оптимального маршрута межкластерного взаимодействия в кластерных БСС на основе построения STN, *отличающийся* от известных тем, что для оценки степени оптимальности маршрута используется специфическая для данных сетей метрическая функция, согласно которой оптимальный маршрут выбирается на основе комбинации параметров уровня сигнала (RSSI), количества переходов до координатора и остаточной энергии предыдущего промежуточного отправителя (ПО) в маршруте.

2. Разработан метод эффективного сбора данных при осуществлении межкластерного взаимодействия в БСС, *позволяющий* за счет детерминированной структуры цикла TDMA избежать коллизий при приеме-передачах данных, *отличающийся* от известных тем, что за каждым ГУК закрепляются временные суперслоты цикла TDMA в конкретных микрослотах которого он может принимать предназначенные ему пакеты в рамках входящего суперкадра, а

каждый передающий ГУК отправляет пакеты, предназначенные принимающему ГУК только в течение микрослота, закрепленного за указанным принимающим ГУК.

3. Впервые для реализации целей маршрутизации в БСС предложено использование детерминированного расписания цикла TDMA и суперкадровой структуры сообщений IEEE 802.15.4, что *позволяет* осуществить маршрутизацию по аналогии с проводными сетями протокола STP.

4. Разработан и исследован оригинальный способ микрослотовой маршрутизации двухадресных пакетов данных, который в сочетании с детерминированным методом TDMA *позволяет* существенно повысить вероятность выполнения требований к качеству обслуживания для трафика реального времени, *отличающийся* от известных тем, что передача пакетов по маршруту доставки данных осуществляется в конкретных микрослотах суперслотов цикла TDMA.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит, прежде всего, в разработке нового алгоритма маршрутизации. При оценке нижней границы длины расписания цикла TDMA, доказано, что предложенный алгоритм микрослотовой маршрутизации позволяет получить почти двукратное уменьшение длительности цикла TDMA по сравнению со слотовой передачей при классической схеме планирования цикла TDMA.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования полученных результатов при планировании, проектировании и эксплуатации БСС. Разработанные алгоритмы, позволяют реализовать эффективную многошаговую маршрутизацию двухадресных пакетов, одновременно с этим повышая надежность и отказоустойчивость БСС.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «ИнтерСвязьСервис» (г. Самара), в ПАО МегаФон (г. Самара), в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики (г. Самара), в ООО ИК «СИБИНТЕК» (г. Москва).

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории графов и матриц, математического и имитационного моделирования.

Положения работы, выносимые на защиту.

1. Показано, что разработанный алгоритм поиска оптимального маршрута межкластерного взаимодействия на основе построения неориентированного STN согласно предложенной специализированной комбинированной метрике *позволяет*

предотвратить не только закольцовывание трафика, но и примерно в два раза сократить задержку доставки данных к КП и увеличить период стабильности сети.

2. Показано, что применение предложенного метода распределения ресурсов детерминированного цикла TDMA *позволяет* предотвратить коллизии суперкадров IEEE 802.15.4, а также увеличить оперативность доставки данных.

3. Доказано, что разработанный алгоритм микрослотовой маршрутизации *позволяет* получить почти двукратное уменьшение длительности цикла TDMA по сравнению со слотовой передачей пакетов при использовании классической схемы детерминированного доступа.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, имитационным моделированием, а также и широким спектром публикаций и выступлений, как на российских, так и на международных конференциях. Основное содержание диссертационной работы докладывалось и обсуждалось на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании» (Севастополь, 2015 г.), НТК «Актуальные вопросы телекоммуникаций Росинфоком-2017» (Самара, 2017 г.), International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (Харьков, 2017 г.), International Science-Technical Conference «Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications» (Минск, 2018 г.), VI–VIII Всероссийских НТК «Информатика и вычислительная техника» (Ульяновск, 2014–2016 гг.), VII–VIII Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах» (Волгоград, 2016–2017 гг.), V Всероссийской НТК с международным участием «Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/IMT 2020 и для других перспективных технологий в интересах цифровой трансформации регионов. РОСИНФОКОМ-2019» (Санкт-Петербург, 2019 г.), XIV–XVIII, XX–XXIII Международных НТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Самара – 2013 г., 2016 г., 2020 г., 2021 г.; Казань – 2014 г., 2017 г., 2019 г.; Уфа – 2015 г., 2018 г.), XXI–XXVII Российских НК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 2014–2020 гг.), XXVIII–XXIX РНТК профессорско-преподавательского состава,

научных сотрудников и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций (Самара, 2021-2022 гг.).

Результаты диссертационной работы также были представлены на конкурсе инноваций и инновационных проектов «Новое поколение 2015/2016», организованном Международной академией связи, по результатам которого представленная на конкурс работа была признана лучшей в номинации «Конкурс исследований».

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 46 опубликованных работах, в том числе в 3 работах, опубликованных в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; в 2 работах, опубликованных в трудах индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus; в 2 патентах РФ на изобретение; в 3 работах, опубликованных в журналах индексируемых в базе данных РИНЦ; в 36 тезисах докладов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 181 страницу, включая 36 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 130 наименований. В приложении А к диссертационной работе приведены патенты на изобретения. В приложении Б к диссертационной работе приведены документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

Личный вклад. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. В опубликованных работах, выполненных вместе с соавторами, вклад автора являлся определяющим.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование выполнено по специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» и соответствует пунктам 1, 3, 18 паспорта специальности 2.2.15.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указаны предмет и объект исследования, сформулирована цель и задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов исследования, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы, описана структура диссертации.

В первой главе диссертационной работы освещаются основные проблемы, связанные с построением и функционированием БСС.

Рассмотрена взаимосвязь Интернета вещей и БСС. Обоснована актуальность применения БСС в различных сферах, в том числе в приложениях мониторинга параметров окружающей среды, которые подразумевают контроль обширных территорий. Установлено, что, несмотря на многочисленные преимущества БСС, эффективность их применения во многом определяется временем жизни, которое зависит от применяемых алгоритмов функционирования, в том числе методов доступа к среде передачи данных и алгоритмов маршрутизации.

Во второй главе приведен краткий обзор и сравнительный анализ известных методов множественного доступа к среде передачи данных при организации межкластерного взаимодействия, рассмотрены известные алгоритмы планирования расписания приемопередач данных. Сформулированы условия бесконфликтной приемопередачи данных. Рассмотрены принципы основных алгоритмов маршрутизации, которые применяются в БСС. Представлены результаты проведенного моделирования в среде NS2 по исследованию влияния структуры сети (числа узлов) на показатели функционирования БСС при применении трех наиболее распространенных в беспроводных сетях протоколов маршрутизации DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector), AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector), ZRP (Zone Routing Protocol). Показано, что при осуществлении в БСС процесса маршрутизации на основе исследуемых протоколов с ростом числа СУ в структуре БСС увеличивается величина сквозной задержки и сокращается период стабильности сети. Это говорит о необходимости применения в БСС специализированных протоколов маршрутизации.

В третьей главе обоснована взаимосвязь задачи доступа к каналным ресурсам с задачей маршрутизации данных от НО до КП в БСС на примере многофазных систем массового обслуживания (СМО). Рассматриваются составляющие разработанного протокола микрослотовой маршрутизации (Time-microslot Routing Protocol, TMRP), а именно алгоритм построения STN, алгоритм централизованного планирования суперслотов в STN (Superslots Scheduling on the Spanning Tree Network, SSSTN), алгоритм микрослотовой маршрутизации.

Предлагаемый подход базируется на суперкадровой структуре сообщений IEEE 802.15.4. При этом процесс построения STN и дальнейшее взаимодействие СУ согласно данному STN можно рассматривать как процесс аналогичный функционированию коммутируемых сетей Ethernet согласно протоколу связующего дерева STP. Однако в рассматриваемых в работе БСС, блокировку портов по

аналогии с проводными сетями Ethernet, в силу очевидных причин произвести невозможно. Для преодоления данного ограничения автором диссертационной работы был предложен и запатентован оригинальный способ маршрутизации в БСС, реализующийся по аналогии с проводными сетями функционирующими на базе STP. Данный способ предусматривает построение STN для межкластерного взаимодействия на основе симметричных каналов, в котором блокировка избыточных каналов и решение проблемы связанной с возможными коллизиями суперкадров IEEE 802.15.4 осуществляется путем временного расписания TDMA. При этом паре узлов (ГУК) в избыточном канале назначаются различные активные временные суперслоты в цикле TDMA.

Реализация протокола TMRP включает три основные фазы.

1. *Фаза инициализации сети*: обнаружение соседей на расстоянии одного перехода (one-hop) посредством широкополосных Hello-пакетов и аппаратное измерение значений RSSI (восходящего $RSSI_{UL}$ / нисходящего $RSSI_{DL}$), обнаружение доступных прямых симметричных / ассиметричных каналов.

2. *Фаза поиска оптимального маршрута до координатора*: координатором сети инициируется процесс построения STN межкластерного взаимодействия путем широкополосной рассылки специального PDU (Protocol Data Unit). В рамках указанного процесса каждый из ГУК должен определить свой родительский ГУК в STN, которому он будет передавать (ретранслировать) предназначенные координатору данные (модель «многие-к-одному» (80-90% объема сетевого трафика)). Предложенный алгоритм построения STN учитывает специфические особенности БСС, в частности введена новая метрическая функция на основе комбинации нескольких параметров:

$$F = M(N_{hop}, E_0, RSSI_{UL}, RSSI_{DL}), \quad (1)$$

где N_{hop} – количество переходов до корня STN (координатора);

E_0 – значение остаточной энергии соседнего ГУК от которого был непосредственно принят данный входящий PDU;

$RSSI_{UL}$ и $RSSI_{DL}$ – измеренные значения восходящего и нисходящего уровня сигнала по отношению к соседнему ГУК.

На Рисунке 1 представлена блок-схема предлагаемого в диссертационной работе алгоритма построения STN согласно которому будут осуществляться все межкластерные коммуникации. Получив, PDU инициирующий построение STN (блок 1), ГУК анализирует таблицу «Одношаговые ГУК» (блок 2).

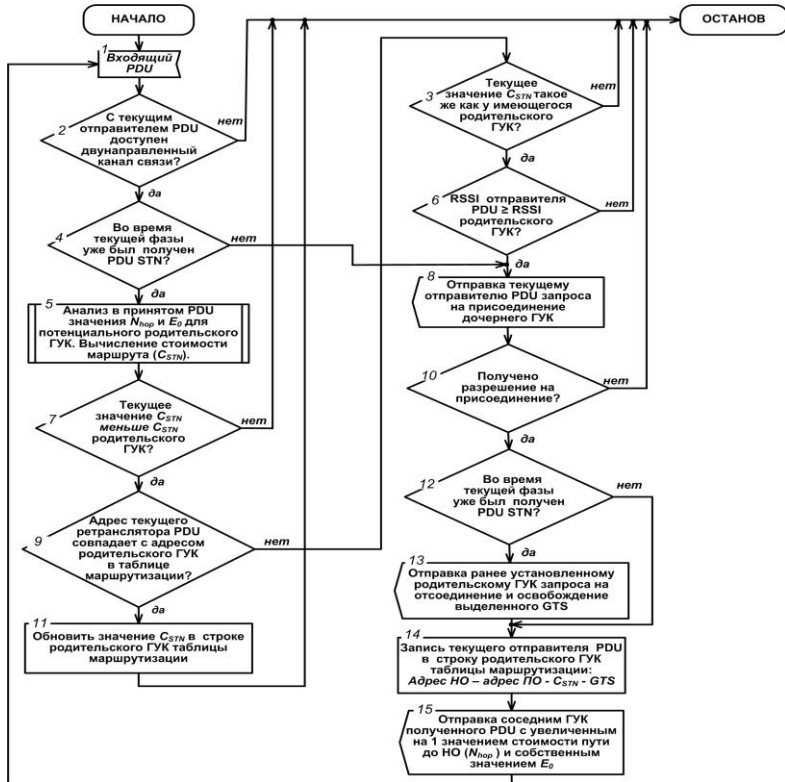


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма построения STN

В случае доступного симметричного канала ГУК выполняет последующую проверку, получал ли он в рамках текущей фазы PDU инициирующий построение STN (блок 4). Если на текущий момент в разделе «Родительский ГУК» таблицы маршрутизации имеется строка с указанным адресом родительского ГУК, стоимостью пути до корня $\left(C_{STN} = \frac{E_0 \times N_{hop}}{100} \right)$, тогда выполняется сравнение C_{STN} с указанным во вновь принятом PDU (блок 5). Если вычисленное текущее значение C_{STN} принятого PDU меньше, то выполняется дальнейшая обработка PDU (блок 7), в противном случае PDU игнорируется. Далее выполняется проверка на предмет сравнения адреса текущего ретранслятора с имеющимся адресом установленного родительского ГУК (блок 9). Если они совпадают тогда текущий ГУК обновляет

значение C_{STN} для текущего родительского ГУК в таблице маршрутизации (блок 11). В противном случае выполняется проверка, совпадает ли значение C_{STN} у вновь принятого PDU с ранее установленным родительским ГУК (блок 3). Если значения C_{STN} совпадают, то согласно предлагаемой комбинированной метрике в этом случае выполняется сравнение значений $RSSI_{UL}$ или $RSSI_{DL}$ из таблицы «Одношаговые ГУК» для имеющегося родительского ГУК и предполагаемого (блок 6). Причем учитывая, что STN будет двунаправленным, то сравнение осуществляется по минимальному значению $RSSI_{UL}$ или $RSSI_{DL}$. В качестве родительского всегда выбирается ГУК с наибольшим минимальным RSSI.

Учитывая, что используемый алгоритм планирования может выделить в каждом суперкадре только 7 GTS, фактически к каждому ГУК может быть присоединено не более 6 дочерних ГУК. Поэтому установление в STN связи «Ребенок – Родитель» возможно только после отправки предполагаемым дочерним ГУК соответствующего запроса предполагаемому родительскому ГУК (блок 8) и получение на данной запрос положительного ответа (блок 10).

Если разрешение на установление связи «Ребенок – Родитель» в STN получено, тогда если текущий ГУК ранее уже устанавливал с другим ГУК связь «Ребенок – Родитель» (блок 12), то он уведомляет ранее выбранный родительский ГУК о своем отсоединении путем отправки соответствующего запроса (блок 13). Получив такой запрос, ранее установленный родительский ГУК удаляет из своей таблицы маршрутизации адрес ранее установленного дочернего ГУК. В свою очередь текущий ГУК в строку с адресом родительского ГУК записывает новые данные (блок 14). Затем текущий дочерний ГУК должен в принятом PDU от своего родительского ГУК увеличить значение N_{hop} на единицу и указать собственное значение E_0 , после чего произвести широковещательную рассылку данного PDU с целью возможного установления связи «Родитель – Ребенок» (блок 15).

3. *Фаза планирования структуры цикла TDMA:* в координаторе реализуется предложенный алгоритм централизованного планирования суперслотов в связующем дереве сети (SSSTN), который базируется на классическом матричном способе и ориентируется не только на бесконфликтное распределение ресурсов цикла TDMA, но и на уменьшение его длительности за счет повторного использования ресурсов. Результатом SSSTN является закрепление бесконфликтных временных суперслотов за каждым ГУК в цикле TDMA, а именно:

– номера активных суперслотов ГУК (один суперслот для передачи собственного суперкадра, за исключением граничных (не

имеющих дочерних ГУК, осуществляющих передачу данных только в течение конкурентного периода доступа суперкадра родительского ГУК в STN), один суперслот приема суперкадра от своего родительского ГУК и k суперслотов (при этом $k \leq 6$) для приема суперкадров от k дочерних ГУК (за исключением граничных ГУК));

– номера неактивных суперслотов ГУК, в течение которых они переходят в энергосберегающий режим «сон».

На Рисунке 2 представлен алгоритм микрослотовой маршрутизации, реализующийся при межкластерном взаимодействии.

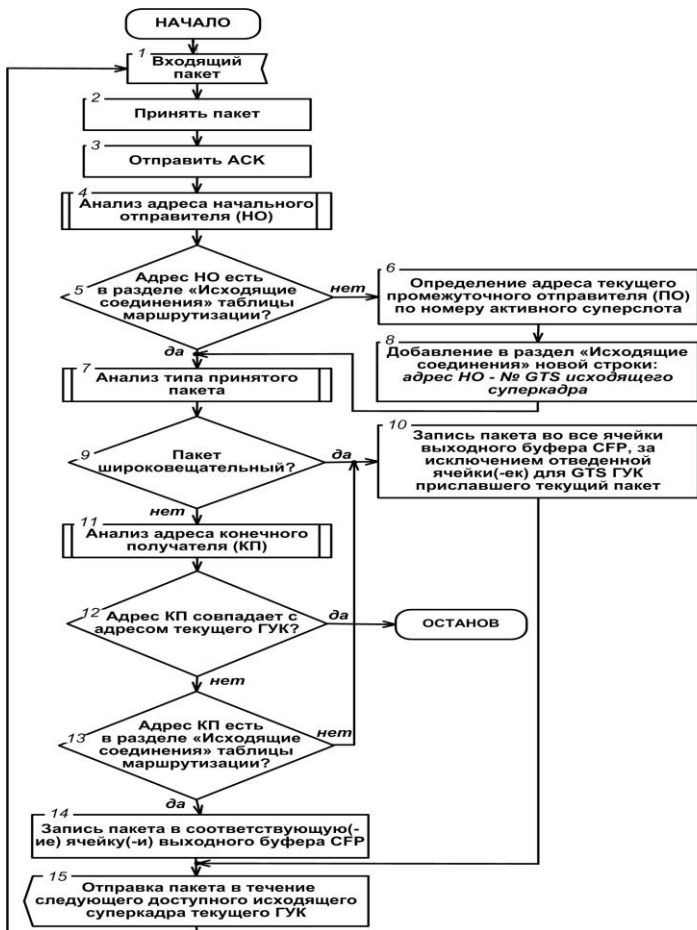


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма микрослотовой маршрутизации

Каждый передающий суперкадр ГУК, отправляет пакеты, предназначенные принимающему ГУК только в течение микрослота (GTS) закрепленного за указанным принимающим ГУК в своем исходящем суперкадре (блок 1). После получения входящего пакета в GTS (блок 2), получивший данный пакет ГУК, должен отправить подтверждение (Acknowledgment, ACK) в этом GTS (блок 3). После отправки ACK текущий ГУК деинкапсулирует пакет, чтобы определить дальнейшие действия по его обработке (блок 4).

Поскольку TMRP является гибридным протоколом маршрутизации, то изначально в ГУК доступны маршруты только до координатора (корня STN) и прямые взаимодействия с родительским и дочерними ГУК. Остальные же маршруты могут быть установлены в процессе многошаговой маршрутизации и записаны в раздел «Исходящие соединения» таблицы маршрутизации. Так, получив входящий пакет, ГУК анализирует его адрес НО для того чтобы сформировать обратный маршрут до текущего адресата. Если в таблице отсутствует маршрут до данного НО (блок 5), то текущий ГУК добавляет новую строку <Адрес НО – номер GTS исходящего суперкадра> (блок 8). При этом номер GTS исходящего суперкадра ГУК, соответствует номеру закрепленного GTS за ГУК от которого был непосредственно получен текущий пакет. В этом случае адрес отправителя пакета (НО или ПО) становится известен по номеру активного суперслота, в течение которого был получен данный пакет (блок 6). Далее анализируется тип пакета (блок 7), если пакет широковещательный (блок 9), то текущий ГУК должен отправить его всем своим соседним ГУК в построенном STN (родительскому и дочернему (-им) ГУК), за исключением ГУК от которого он получил данный пакет (блок 10). В противном случае анализируется адрес КП (блок 11). Алгоритм маршрутизации заканчивается при совпадении адреса указанного КП с адресом ГУК (блок 12). В противном случае для поиска маршрута до КП анализируется раздел «Исходящие соединения» (блок 13). Если маршрут найден, тогда пакет записывается в соответствующую(-ие) ячейку(-и) выходного буфера CFP (Contention free period) (блок 14) и отправляется в соответствующем GTS следующего исходящего суперкадра (блок 15).

Таким образом, разработанный алгоритм микрослотовой маршрутизации позволяет осуществить маршрутизацию двухадресных пакетов, по аналогии с тем как это реализуется в проводных сетях протокола STP. При этом, если в проводных сетях протокола STP коммутатор, получив пакет с адресом НО в дальнейшем будет направлять пакеты, предназначенные данному адресату (НО) через

порт с которого ранее был получен пакет с адресом текущего НО, то в рассматриваемых БСС – в рамках своего суперкадра в закреплённом GTS за ГУК от которого был получен данный пакет с адресом НО.

В **четвертой главе** при оценке выигрыша алгоритма микрослотовой маршрутизации по сравнению с классической слотовой схемой передачи пакетов искомая сеть характеризуется смешанным графом $G = \langle V, E \rangle$. То есть ГУК сопоставляется множество вершин $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, а доступным прямым межкластерным связям – множество неупорядоченных или упорядоченных пар элементов $\{v_i, v_j\} \subseteq V$, являющиеся ребрами этого графа $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. Построение STN состоит в нахождении неориентированного связного ациклического остова подграфа $T \subset G$. Полагая, что вес вершины $v_i \in V (\forall i \in [0; n])$ определяется переменной g_i , значение которой соответствует числу ее дочерних вершин в дереве T (STN), получим что степень вершины с учетом родительской вершины (ребра):

$$\delta_i = \begin{cases} g_i + 1, & \forall i \in [1; n]; \\ g_i, & \forall i = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая ограниченное число микрослотов в CFP очевидно:

$$\delta_i \leq \delta_m, \quad (3)$$

где $\delta_m = 7$ – максимально допустимое значение $\delta_i (\forall i \in [0; n])$.

Тогда с учетом выражений (2) и (3) вполне очевидно:

$$g_i \leq g_m, \quad (4)$$

где g_m – максимально допустимое значение g_i в T ; $g_m = 6$ для всех вершин кроме корневой, для которой $g_m = 7$.

При сделанных допущениях и в предположении, что все вершины подключаются к T независимо и равновероятно, значения g_i будут иметь стохастичный характер и подчиняться биномиальному закону распределения определяемому формулой Бернулли:

$$P_{g_m}(g_i) = C_{g_m}^{g_i} \cdot \left(\frac{\bar{g}}{g_m}\right)^{g_i} \cdot \left(1 - \frac{\bar{g}}{g_m}\right)^{g_m - g_i}, \quad (5)$$

где \bar{g} – среднее значение g_i без учета конечных вершин ($V_k (g_i = 0)$).

Для рассматриваемой модели наступление в одном испытании события A эквивалентно появлению одной дочерней вершины (одного ветвления) у испытуемой вершины. Количество ребер в T можно определить как общее число вершин за вычетом конечных умноженное на средний вес вершин, то есть $(V - V_k) \cdot \bar{g}$. Но с другой

стороны, количество ребер в T равно общему числу вершин, не считая корня, то есть $(V - 1)$. Откуда получим:

$$\bar{g} = \frac{V-1}{V-V_k} = \frac{1-\frac{1}{V}}{1-\frac{V_k}{V}}. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом сделанных предположений, значение \bar{g} при $V \geq 10$ практически не зависит от абсолютного числа вершин V в дереве T , а зависит от отношения V_k/V . Как уже отмечалось (6) определяет среднее значение g_i (\bar{g}) для вершин T без учета V_k , если же при вычислении учитывать все вершины в T , то очевидно, что вес вершин в этом случае будет меньше чем \bar{g} . Если учесть, что в T всегда ребер на единицу меньше числа вершин, то значение \bar{g}_i , которое характеризует среднее число инцидентных вершине ребер:

$$\bar{g}_i = \left(1 - \frac{V_k}{V}\right) \cdot \bar{g} = 1 - \frac{1}{V} = \frac{V-1}{V} \approx 1. \quad (7)$$

Разработанный алгоритм микросотовой маршрутизации предполагает выделение всем ГУК, за исключением концевых, гарантированного ресурса в цикле TDMA в виде одного временного суперслота для передачи суперкадра (данных) родительскому и дочерним ГУК в STN. Таким образом, даже если не учитывать число концевых ГУК (V_k) в STN, то в самом худшем случае (в том числе без параллельных приемопередач в сети) цикл TDMA будет включать V слотов, но нужно учитывать, что все ребра двунаправленные и каждому ребру, по сути, соответствует две связи, каждая из которых требует предоставление отдельного суперслота, поэтому в данном случае цикл TDMA должен включать G слотов:

$$G = 2 \cdot (V - 1). \quad (8)$$

Допустим выбор того или иного способа распределения ресурсов цикла TDMA (по числу узлов/ребер) определяется полезностью решения, которая выражается в наличии выигрыша или проигрыша по количеству временных слотов в цикле TDMA. Тогда выигрыш в нашем случае можно оценивать с помощью коэффициента эффективности алгоритма k_i , который показывает во сколько раз можно уменьшить требуемое число слотов в цикле TDMA при применении схемы предусмотренной TMRP. Тогда без учета V_k :

$$k_i = \frac{G}{V} = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{V}\right) \approx 2. \quad (9)$$

Поскольку в (9) не учитывается число концевых вершин (V_k) в структуре STN, вполне очевидно, то что на практике значение выигрыша разработанного алгоритма может быть куда больше:

$$k_i = \frac{G}{V - V_k} = 2 \cdot \left(\frac{1 - \frac{1}{V}}{1 - \frac{V_k}{V}} \right). \quad (10)$$

В пакете MATLAB R2015a для исследования влияния параметров распределения на структуру STN был реализован алгоритм построения STN с распределением весов вершин по биномиальному закону. В рамках исследуемых сценариев получены следующие значения выигрыша – 2.79, 4.6, 9.

Для исследования разработанного протокола TMRP было применено агентное моделирование в среде AnyLogic. На Рисунке 3 представлены гистограммы по распределению времени нахождения пакетов в сети, то есть от момента генерации НО до получения КП.

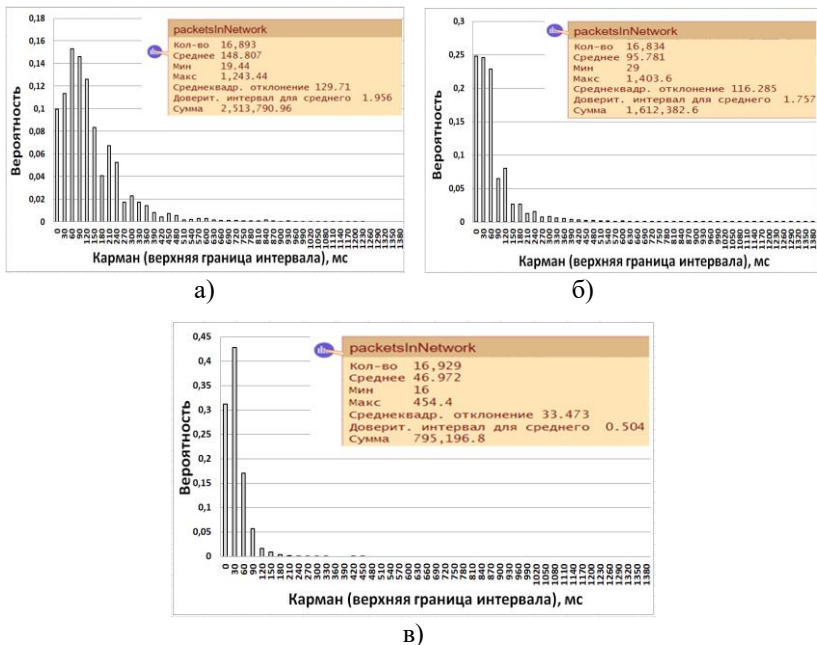


Рисунок 3 – Гистограммы распределения времени нахождения пакетов в сети: а) классический слотовый TDMA; б) микрослотовый TDMA с построением STN согласно метрике числа переходов до КП; в) микрослотовый TDMA согласно TMRP

На Рисунке 4 представлены результаты исследования зависимости времени жизни сети от числа ГУК для исследуемых сценариев (TMRP со слотовым TDMA (сценарий 1), TMRP с построением STN согласно классической метрике числа переходов (сценарий 2), TMRP с микрослотовым TDMA и комбинированной метрикой (сценарий 3)).

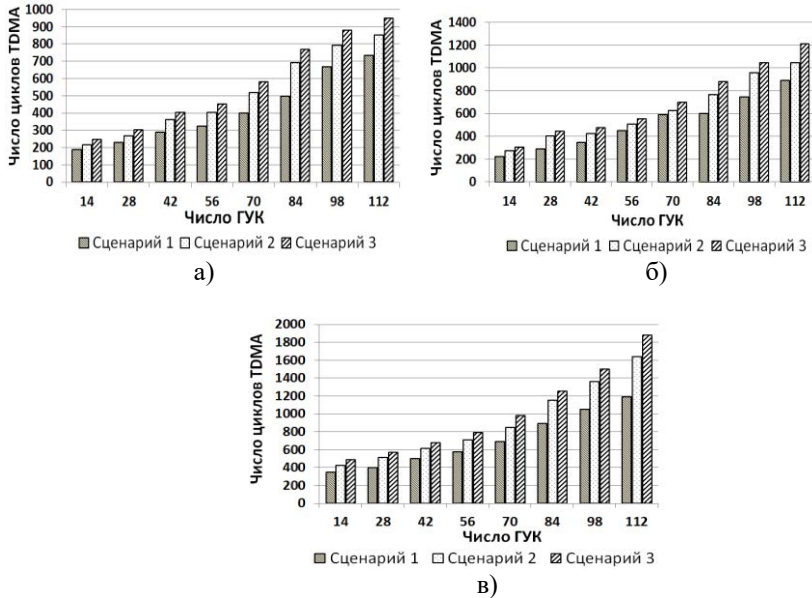


Рисунок 4 – Оценка энергоэффективности TMRP по числу циклов TDMA до отключения: (а) первого ГУК; (б) 50% ГУК; (в) 100% ГУК

Согласно представленным на Рисунке 3 и Рисунке 4 результатам исследования наглядно видно, что разработанный протокол TMRP на базе микрослотового TDMA и комбинированной метрики позволил не только сократить задержку доставки данных в процессе многошаговой маршрутизации данных до КП, но и обеспечить энергоэффективность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ методов и технологий построения БСС, который показал, что, несмотря на многочисленные преимущества и широкий спектр областей применения БСС, сегодня в данных сетях по-прежнему актуальны проблемы, вызванные ограниченными

энергетическими ресурсами автономных батарей СУ и ограничениями на время доставки данных для приложений реального времени. Причем наиболее энергозатратными операциями являются прослушивание канала (в т.ч. получение доступа к среде передачи данных) и приемопередача данных (в т.ч. процесс маршрутизации). Поэтому актуальна разработка алгоритмов направленных на повышение эффективности сбора информации в БСС, учитывающих специфические особенности БСС.

2. Проведен анализ процессов обмена информацией в БСС на примере многофазных СМО, в частности рассмотрены методы доступа к каналным ресурсам и алгоритмы маршрутизации. Методом имитационного моделирования в симуляторе NS2 произведена оценка эффективности широко применяемых в беспроводных сетях протоколов маршрутизации DSDV, AODV, ZRP и их применимости в БСС. В исследуемых сценариях реактивный протокол AODV показал наилучшие результаты по энергоэффективности, но при этом обеспечивается наибольшая средняя задержка. Выявлено, топология сети оказывает существенное влияние на показатели функционирования сети, в том числе на величину задержки и период стабильности сети. При этом при использовании данных протоколов период стабильности сети оказался незначительным. Что говорит о необходимости применения в БСС специализированных протоколов маршрутизации, которые при выборе маршрута будут учитывать не только число переходов, но также остаточную энергию СУ и характеристики радиоканала.

3. Для достижения цели исследования разработан протокол TMRP, в основе которого заложены базовые идеи сетевого взаимодействия в коммутируемых проводных сетях, работающих по протоколу STP. Составляющими протокола TMRP являются разработанные автором текущей диссертационной работы алгоритм построения STN, алгоритм SSSTN и алгоритм микросотовой маршрутизации.

4. Предложенная метрическая функция для построения STN позволяет учитывать не только число переходов до координатора, но также уровень сигнала (RSSI) и остаточную энергию предыдущего ПО в маршруте, что позволяет сократить величину средней задержки примерно на 51% и увеличить период стабильности примерно на 15% (по сравнению с метрикой «число переходов до КП»).

5. Для предотвращения коллизий суперкадров IEEE 802.15.4 и обеспечения оперативного информационного обмена между ГУК, в том числе при маршрутизации данных к координатору, было

предложено использование детерминированной структуры цикла TDMA, которая включает суперслоты для передачи суперкадров IEEE 802.15.4. В конкретных микрослотах CFP суперкадра осуществляются гарантированные приемопередачи между источником суперкадра и синхронизируемыми с ним ГУК в STN. Тогда как известные решения предполагают использование слотового TDMA, согласно которому в одном таком суперслоте осуществляется приемопередача данных только между источником и конкретным получателем. Последнее эффективно лишь в БСС с высокой интенсивностью трафика, в противном случае часть выделенного временного ресурса затрачивается впустую, что, несомненно, сказывается на величине возникающей сквозной задержки, а также на энергетических ресурсах. Так, по результатам проводимых экспериментов было установлено, что по сравнению со слотовым TDMA средняя задержка при использовании микрослотового TDMA сокращается примерно на 55%, а период стабильности увеличивается примерно на 40%.

6. Разработан и исследован оригинальный алгоритм микрослотовой маршрутизации двухадресных пакетов данных, который в сочетании с детерминированным методом TDMA позволяет существенно повысить вероятность выполнения требований к качеству обслуживания трафика реального времени, отличающийся от известных тем, что передача пакетов по маршруту доставки данных осуществляется в конкретных микрослотах суперслотов цикла TDMA.

7. В качестве основного вывода можно отметить, что в рамках диссертационного исследования разработаны алгоритмы позволяющие оптимизировать сбор данных БСС, за счет совместного решения таких важных для БСС задач, как доступ к каналному ресурсу и маршрутизация двухадресных пакетов содержащих адрес НО и КП.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшие исследования будут посвящены разработке на основе протокола TMRP протокола маршрутизации для БСС с мобильными СУ, в том числе для летающих сенсорных сетей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. Голубничая, Е. Ю. Упрощенный алгоритм маршрутизации в Wi-Fi mesh-сетях мониторинга / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12. – №2. – С. 53-57.

2. Голубничая, Е. Ю. Временное планирование в кластерных беспроводных сенсорных сетях ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10. – № 1. – С. 5-10.

3. Голубничая, Е. Ю. Энергоэффективный синхронизированный доступ к каналам передачи данных в кластерных беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – №8. – С. 9-18.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science

4. Golubnichaya, E. Analysis of wireless sensor networks characteristics / E. Golubnichaya // Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology». – Kharkov, 2017. – P. 261-264.

5. Golubnichaya, E. Y. Slot data routing in cluster wireless sensor networks based on time synchronization of cluster heads / E. Y. Golubnichaya, B. Y. Likhtsinder // Proceedings of the International Scientific-Technical Conference «Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications». – Minsk, 2018. – P. 1-5.

Патенты

6. Патент на изобретение РФ № 2618378, МПК H04W 40/02 (2009.01). Способ слотовой маршрутизации в беспроводных сетях ZigBee / Лихтциндер Б. Я., Голубничая Е. Ю., Иванова Л. Б.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУТИ. – № 2015138170; заявл. 07.09.2015; опубл. 03.05.2017, Бюл. №13. – 8 с.

7. Патент на изобретение РФ № 2640349, МПК H04W 40/02 (2009.01). Способ маршрутизации в беспроводных сетях ZigBee / Лихтциндер Б. Я., Голубничая Е. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУТИ. – № 2016130621; заявл. 25.07.2016; опубл. 28.12.2017, Бюл. №1. – 9 с.

Работы в научных журналах, индексируемых в РИНЦ

8. Голубничая, Е. Ю. Особенности применения протокола STP в сетях организованных на базе технологии ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – №7-1 (18-1). – С. 282-286.

9. Голубничая, Е. Ю. Способ слотовой маршрутизации в кластерных древовидных сетях ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Информационные технологии и управление. – 2015. – Т.1. – №1. – С. 101-106.

10. Голубничая, Е. Ю. Слововая маршрутизация данных в кластерных беспроводных сенсорных сетях на основе временной синхронизации головных узлов кластеров / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – Т. 9. – №3. – С. 68-74.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

11. Голубничая, Е. Ю. Сенсорные сети мониторинга распределённых объектов / Е.Ю. Голубничая, Б.Я. Лихтциндер, М.П. Чеботарёва // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций (ПТиТТ-2013): материалы XIV МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2013. – С. 118.

12. Голубничая, Е. Ю. Контроль уровня воды на прилегающих территориях водоемов на основе сети GSM / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер, А. С. Чернышов // ПТиТТ-2013: материалы XIV МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2013. – С. 152-153.

13. Голубничая, Е. Ю. Сбор и анализ информации на основе беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // XXI РНК профессорско-преподавательского состава (ППС), научных сотрудников (НС) и аспирантов. – Самара: ПГУТИ, 2014. – С. 74.

14. Голубничая, Е. Ю. Алгоритм маршрутизации Wi-Fi mesh-сети / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Информатика и вычислительная техника (ИВТ-2014): сборник научных трудов VI Всероссийской НТК аспирантов, студентов и молодых ученых. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 335-338.

15. Голубничая, Е. Ю. Режимы работы протокола маршрутизации HWMP в Wi-Fi Mesh-сетях мониторинга / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // ПТиТТ-2014: материалы XV МНТК. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2014. – Т. 1. – С. 407-409.

16. Голубничая, Е. Ю. Проблема коллизии маячков в кластерных древовидных сетях ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // ИВТ-2015: сборник научных трудов VII Всероссийской НТК аспирантов, студентов и молодых ученых. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 354-357.

17. Голубничая, Е. Ю. Синхронизация в кластерных древовидных сетях ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Информационные технологии и информационная

безопасности в науке, технике и образовании «ИНФОТЕХ – 2015»: материалы международной НПК. – Севастополь: СевГУ, 2015. – С. 62-63.

18. Голубничая, Е. Ю. Применение протокола STP при реализации сетей ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер, Д. Р. Ибатуллин // ПТИТТ-2015: материалы XVI МНТК. – Уфа: УГАТУ, 2015. – Т. 1. – С. 203-205.

19. Голубничая, Е. Ю. Концепция организации беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер, Д. А. Сайкин // ПТИТТ-2015: материалы XVI МНТК. – Уфа: УГАТУ, 2015. – Т. 1. – С. 205-206.

20. Голубничая, Е. Ю. Метод временного разделения для предотвращения коллизий маячков в кластерных древовидных сетях ZigBee / Е. Ю. Голубничая // ПТИТТ-2015: материалы XVI МНТК. – Уфа: УГАТУ, 2015. – Т. 1. – С. 159-161.

21. Голубничая, Е. Ю. Выбор корневого узла в кластерных беспроводных сенсорных сетях мониторинга / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // XXII РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2015. – С. 60-61.

22. Голубничая, Е. Ю. Разработка и анализ модели беспроводной сенсорной сети / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // VIII Всероссийская НТК аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2016. – Ульяновск: УлГУ, 2016. – С. 179-181.

23. Голубничая, Е. Ю. Анализ характеристик беспроводной сенсорной сети на базе стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Д. В. Ключников // VII Всероссийская НПК «Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах». – Волгоград: ВолГУ, 2016. – С. 34-38.

24. Голубничая, Е. Ю. Алгоритм слотовой маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях на основе стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // ПТИТТ-2016: материалы XVII МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 588-589.

25. Голубничая, Е. Ю. Особенности маршрутизации в сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // ПТИТТ-2016: материалы XVII МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 410-411.

26. Голубничая, Е. Ю. Классы типовых объектов сетей связи в системе моделирования AnyLogic / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер, Д. Р. Ибатуллин // XXIII РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 41.

27. Голубничая, Е. Ю. Определение метрики между узлами кластерной древовидной сети ZigBee / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // XXIII РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 40.

28. Голубничая, Е. Ю. Выбор оптимальных маршрутов передачи данных в беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // ПТИТТ-2017: материалы XVIII международной НТК. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т.1. – С. 239-240.

29. Голубничая, Е. Ю. Исследование влияния типа трафика на показатели качества функционирования беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2017. – № 7. – С. 316-321.

30. Голубничая, Е. Ю. Агрегирование данных в беспроводных сенсорных сетях мониторинга / Е. Ю. Голубничая // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах: сборник докладов и тезисов VIII Всероссийской НПК. – Волгоград: ВолГУ, 2017. – С. 37-42.

31. Голубничая, Е. Ю. Исследование влияния DoS атак маршрутизации на эффективность функционирования беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая, Д. А. Репечко // Современные проблемы и задачи обеспечения информационной безопасности: сборник статей НПК. – Москва: МФЮА, 2017. – С. 134-141.

32. Голубничая, Е. Ю. Применение алгоритмов TDMA планирования в кластерных гетерогенных беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // Росинфоком-2017 «Актуальные вопросы телекоммуникаций»: материалы НТК. – Самара: ПГУТИ, 2017. – С. 27-28.

33. Голубничая, Е. Ю. Алгоритмы TDMA планирования кластерных беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая // XXIV РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2017. – С. 81.

34. Голубничая, Е. Ю. Механизмы агрегирования данных в беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая, В. В. Герасимов // Сборник материалов III международной научно-практической очно-заочной конференции «Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий». – М.: «Дом педагогики», 2017. – С. 31-34.
35. Голубничая, Е. Ю. Применение детерминированного расписания TDMA в беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // ПТиТТ-2018: материалы XX международной НТК. – Уфа: УГАТУ, 2018. –Т. 1. – С. 135-137.
36. Голубничая, Е. Ю. Слотовая маршрутизация данных в беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // XXV РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2018. – С. 29.
37. Голубничая, Е. Ю. Маршрутизация данных в кластерных беспроводных сенсорных сетях на основе метода TDMA / Е. Ю. Голубничая, Б. Я. Лихтциндер // XXVI РНК ППС, НС и аспирантов: материалы конференции. – Самара: ПГУТИ, 2019. – С. 40-41.
38. Голубничая, Е. Ю. Использование детерминированного расписания цикла TDMA для решения задач маршрутизации в беспроводных кластерных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // V Всероссийская НТК с международным участием «Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/IMT 2020 и для других перспективных технологий в интересах цифровой трансформации регионов. РОСИНФОКОМ-2019»: сборник научных статей. – Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2019. – С. 46-50.
39. Голубничая, Е. Ю. Быстрый сбор данных для приложений беспроводных сенсорных сетей с управляемой событиями моделью отправки данных / Е. Ю. Голубничая // ПТиТТ-2019: материалы XXI МНТК. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – Т. 1. – С. 371-372.
40. Голубничая, Е. Ю. Разработка агентной имитационной модели беспроводной сенсорной сети в среде AnyLogic / Е. Ю. Голубничая, Д. С. Иванов // ПТиТТ-2019: материалы XXI МНТК. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – Т. 1. – С. 373-375.
41. Голубничая, Е. Ю. Оптимизация сбора данных в синхронизированных беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // Материалы XXVII РНК ППС, НС и аспирантов. – Самара: ПГУТИ, 2020. – С. 20-21.
42. Голубничая, Е. Ю. Особенности MAC-протоколов для чувствительных к задержкам беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая // ПТиТТ-2020: материалы XXII МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2020. – С. 150-151.
43. Голубничая, Е. Ю. Интеграция функций маршрутизации и множественного доступа к среде передачи данных в беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // Материалы XXVIII РНТК ППС, НС и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций. – Самара: ПГУТИ, 2021. – С. 28-29.
44. Голубничая, Е. Ю. Энергоэффективный протокол маршрутизации для кластерных древовидных беспроводных сенсорных сетей на основе планирования сеансов связи между головными узлами кластеров / Е. Ю. Голубничая // ПТиТТ-2021: материалы XXIII МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2021. – С. 93-94.
45. Голубничая, Е. Ю. Маршрутизация данных с учетом требований QoS для беспроводных сенсорных сетей / Е. Ю. Голубничая, А. А. Серов // ПТиТТ-2021: материалы XXIII МНТК. – Самара: ПГУТИ, 2021. – С. 95-96.
46. Голубничая, Е. Ю. Использование микрослотовой маршрутизации для обеспечения качества обслуживания в стационарных беспроводных сенсорных сетях / Е. Ю. Голубничая // Материалы XXIX РНТК ППС, НС и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций. – Самара: ПГУТИ, 2022. – С. 30-31.

Подписано в печать 18.11.2022 г. Формат 60 х 84/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать оперативная. Усл. печ. л. 1,375. Тираж 100 экз. Заказ №100023790
