

На правах рукописи

Миклуш Виктория Александровна

**Модели и алгоритмы обеспечения гарантированной доставки данных
в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях
с ячеистой топологией**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре информационных систем и технологий.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Татарникова Татьяна Михайловна

Официальные
оппоненты: **Сухопаров Михаил Евгеньевич,**
доктор технических наук,
Санкт-Петербургский филиал
АО «НПК «ТРИСТАН», заместитель директора
по научной работе

Богатырев Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук
ООО «Ядро Центр Разработки Объектных
Хранилищ», Департамент разработки объектных
хранилищ, эксперт по разработке ПО

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 15 ноября 2023 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

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

Автореферат разослан 15 сентября 2023 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

А.И. Парамонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Беспроводные сенсорные сети (БСС Wireless Sensor Network – WSN) являются самым быстро развивающимся сектором инфокоммуникационных систем. Если первые сенсорные сети имели узконаправленное назначение – военное дело, то современные БСС используются для мониторинга параметров окружающей среды, автоматизации производства, контроля территорий, внешних параметров объектов мониторинга и других важных задач.

Несмотря на продолжительную историю исследований беспроводных сенсорных сетей, концепция их построения еще до конца не сформировалась и не нашла отражение в виде определенных программно-аппаратных (платформенных) решений. Реализация БСС зависит от конкретных требований к функционалу сенсорных узлов и качеству предоставляемого БСС сервиса.

В силу особенных свойств БСС: самоорганизации, ограничения беспроводной среды передачи и ресурсов узлов сети, рост числа сенсорных узлов, для БСС остается актуальной задача гарантированной доставки данных с соблюдением требований на качество предоставляемого сервиса. Решение этой задачи распадается на три частные взаимосвязанные задачи:

Во-первых, доставка данных выполняется по установленному соединению от источника к адресату через транзитные узлы. Соответственно каждый транзитный узел, должен находиться в зоне чувствительности своего ближайшего соседа – тоже транзитного узла. И таких соединений должно быть несколько из-за возможной потери связности между узлами или смены режима функционирования сенсорных узлов. Таким образом, требуются эффективные алгоритмы маршрутизации, устанавливающие пути для передачи данных с учетом особенностей БСС.

Во-вторых, очевидно, что установление маршрута доставки данных зависит от геометрии размещения сенсорных узлов на территории развертывания БСС. Таким образом, необходимы алгоритмы размещения сенсорных узлов, способствующие появлению нескольких соединений от узла источника до узла адресата.

В-третьих, требуется определение показателя качества БСС, характеризующего выполнение беспроводной сенсорной сетью основной функции – передачи собранных и обработанных данных в условиях энергетических и вычислительных ограничений возможностей узлов, их подвижности, протоколов передачи данных и других. Таким образом,

необходимы модели оценки характеристик БСС, влияющих на качество сервиса, предоставляемого БСС.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию беспроводных сенсорных сетей посвящены работы А.Е. Кучерявого, Р.В. Киричка, В.А. Варгаузина, В.В. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, И.Е. Осипова, А.И. Парамонова, А.В. Рослякова, О.И. Кутузова, Т.М. Татарниковой, О.И. Шелухина, I.F. Akyildiz, J.F. Kurose, K.W. Rosse, A.S. Tanenbaum, G. Messier, W.R. Heinzelman, I.G. Finvers, P. Wang, Q. Wang, T. Zhang и многих других. В работах этих авторов решаются задачи маршрутизации, предлагаются новые алгоритмы кластеризации БСС и модели передачи данных. Однако, вопросам планирования БСС под требования показателей качества уделяется недостаточно внимания и остаются открытыми вопросы подбора параметров сенсорных узлов, эффективного размещения сенсорных узлов на заданной территории и новых алгоритмов маршрутизации для обеспечения гарантированной доставки данных до узла назначения.

Научная задача диссертационной работы сформулирована как разработка моделей и алгоритмов, обеспечивающих качественный сервис по доставке данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией.

Объектом исследования являются самоорганизующиеся беспроводные сенсорные сети с ячеистой топологией.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы для самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей с ячеистой топологией, обеспечивающих гарантированную доставку данных.

Цель диссертационной работы заключается в обеспечении гарантированной доставки данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией.

Сформулированы следующие **задачи**, способствующие достижению цели диссертационной работы:

1. Найти решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов разной физической природы на заданной территории.
2. Разработать алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.
3. Выполнить имитационное моделирование самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы обусловлена созданием новых моделей и алгоритмов обеспечения гарантированной доставки данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией.

1. Предложено новое решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов по критериям полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети, что позволяет определить геометрию расположения датчиков различной физической природы на заданной территории по критерию получения максимума информации при допустимых границах искажения сигнала.

2. Разработан новый алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией, отличающийся от известных тем, что построение маршрутов доставки данных выполняется по комплексному критерию, учитывающему свойства данного класса инфокоммуникационных сетей, что позволяет улучшить значения вероятностно-временных характеристик доставки данных.

3. Разработана имитационная модель самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией, отличающаяся от известных тем, что не требует навыков программирования при оценивании качества предоставляемого сервиса по доставке данных.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что предложенные модели, алгоритмы, их программная реализация и полученные зависимости способствуют проектированию беспроводной сенсорной сети с требуемым качеством сервиса по доставке данных.

Реализация результатов работы. Основные научные результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Информационные системы и технологии» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения в подготовке бакалавров по направлению «Информационные системы и технологии» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Инфокоммуникационные системы и сети», «Методы искусственного интеллекта» и «Теория информации, данные, знания».

Методология и методы исследования. Решение задач, сформулированных в диссертационной работе, базируется на методах математического моделирования, оптимизации, теории вероятности и

математической статистики, информационного обмена, случайных процессов, принципов построения и работы систем, сетей, устройств беспроводных сенсорных сетей.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов разной физической природы на заданной территории.

2. Алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

3. Имитационная модель самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

Степень достоверности и апробации работы. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается комплексом теоретических исследований и подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами аналитического и имитационного моделирования.

Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVI всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (г. Москва, 2018); XI Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2019)» (2019); XVII Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2020)» (2020); Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» (г. Санкт-Петербург, 2020); VI межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (г. Севастополь, 2020); V Международной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии в моделировании и управлении» (г. Ялта, 2020), кафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), 2018–2020 гг. и Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП), 2021–2023 гг.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 30 печатных работах, среди которых 9 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах

цитирования. Основные результаты защищены 3 свидетельствами о регистрации программы для ЭВМ. 15 работ опубликовано в других изданиях и сборниках конференций. 2 работы опубликованы без соавторов.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 99 источников. Текст диссертации изложен на 144 страницах, включая 75 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность работы, научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Определены объект, предмет и цель исследования.

В первой главе представлена предложенная концептуальную модель самоорганизующейся БСС на уровне описания узлов, свойств сети, основных характеристик оценки качества сети и алгоритмов маршрутизации.

Рассмотрены базовые элементы самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети: сенсорное устройство (узел), координатор, маршрутизатор, шлюз, базовая станция. Приведены их структурные схемы, функции и возможные конфигурации организации взаимодействия беспроводных сенсорных сетей между собой и сетью Интернет.

Рассмотрены основные особенности БСС, такие как ограниченные ресурсы узлов, самоорганизация БСС, характер размещения узлов на заданной территории и другие, влияющие на показатели качества предоставляемого БСС сервиса. Установлено, что при существующих особенностях БСС, качество предоставляемого сервиса по доставке данных является интегральной характеристикой.

Показано, что качество БСС выражается через значения характеристик, которые должны удовлетворять требуемым значениям качества сервиса, предоставляемого БСС – доставки данных от узла источника (И-узла) к адресату (А-узлу). За характеристику качества предоставляемого сервиса принята вероятность установления соединения от И-узла к А-узлу через транзитные узлы (Т-узел), то есть возможность построения выделенного маршрута для дальнейшей передачи данных за допустимое время.

Беспроводная сенсорная сеть представлена ненаправленным графом $G(V, C)$, где V – это множество узлов БСС; C – множество каналов, образуемых между соседними узлами.

Задача диссертационного исследования сформулирована как разработка модельного и алгоритмического обеспечения гарантированной доставки данных с соблюдением требований на качество предоставляемого сервиса.

Таким образом, множество альтернативных маршрутов, построенных от И-узла к А-узлу на графе G есть множество ациклических маршрутов R как цепочки узлов $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ таких, что $1 < i < n, (v_i, v_{i+1}) \in C$.

Значение характеристики зависит:

1) от внутренних параметров: структуры БСС, технических характеристик узлов и каналов БСС, обозначим как множество $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$:

p_1 – производительность сенсорного узла на маршруте от И-узла к А-узлу, является технической характеристикой узла;

p_2 – пропускная способность канала, установленного между i -м узлом и $(i + 1)$ -м узлом (узлами-соседями), определяется как $\Lambda = \lambda/\bar{L}$, где λ – производительность узла, бит/с; \bar{L} – средняя длина пакета. Соответственно пропускной способностью R маршрута считается минимальная пропускная способность среди всех каналов на маршруте: $p_2(R) = \min \{p_2(v_i, v_{i+1})\}, i \in R$.

p_3 – уровень заряда батареи сенсорного узла на маршруте от И-узла к А-узлу, является изначально известной технической характеристикой узла. С каждой операцией, выполненной сенсорным узлом уровень заряда батареи, падает.

p_4 – загрузка сенсорного узла;

p_5 – длина очереди на обслуживание в узле;

p_6 – число «скачков» от И-узла к А-узлу;

2) внутренних и внешних воздействий: переход узлов в режим сна и выход из него, подвижность узлов – множество $H = \{h_1, h_2, \dots, h_d\}$:

h_1 – состояние j -го сенсорного узла на маршруте от И-узла к А-узлу: 1 – узел активен, 0 – узел находится в режиме сна.

h_2 – число попыток для установления соединения между i -м узлом и $(i + 1)$ -м узлом (узлами-соседями).

h_3 – вероятность разрыва соединения между i -м узлом и $(i+1)$ -м узлом из-за их подвижности;

Таким образом, функционал F модели БСС в общем виде:

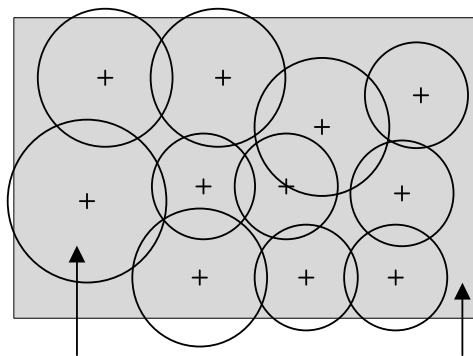
$$Ch(t) = F(G, P(t), H(t), t). \quad (1)$$

Показано, что решение задачи диссертации распадается на три подзадачи:

1. Оптимальное размещение узлов БСС на заданной территории для обеспечения нескольких маршрутов доставки данных;
2. Выбор маршрута доставки данных из нескольких возможных по показателям, актуальным для БСС и обеспечением качества предоставляемой услуги.
3. Создание имитационной модели, как средства для выбора структуры и параметров БСС на этапе проектирования БСС.

Во второй главе найдено решение многоцелевой задачи оптимального расположения узлов БСС на заданной территории по критерию получения максимума информации для обеспечения нескольких маршрутов доставки данных на примере распределенной многосенсорной системы мониторинга. Решение задачи включает:

- нахождение оптимального расположения сенсорных узлов с точки зрения полного покрытия зоны ответственности сети мониторинга зонами чувствительности сенсорных узлов (рисунок 1) – создание сплошного сенсорного поля;
- нахождения оптимального расположения сенсорных узлов с точки зрения оптимизации информационных потоков в сети мониторинга (рисунок 2).



Зона чувствительности сенсорного узла
Часть зоны ответственности БСС, не попавшая в зону чувствительности сенсорных узлов

Рисунок 1 – Покрытие зоны ответственности сети мониторинга зонами чувствительности сенсорных узлов

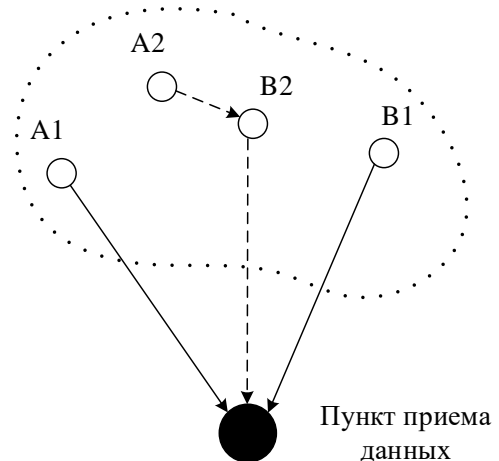


Рисунок 2 – Организация трафика в сети мониторинга

При определении оптимального расположения датчиков БСС с точки зрения полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков разработан алгоритм перекрытия зон чувствительности k одинаковых

сенсоров, расположенных, как показано на рисунке 3, где дуга периметра зоны чувствительности сенсора s_i , опирающаяся на угол $[\pi-\alpha, \pi+\alpha]$ попадает в зону чувствительности сенсора s_j и $\alpha = \arccos\left(\frac{d(s_i, s_j)}{2r}\right)$.

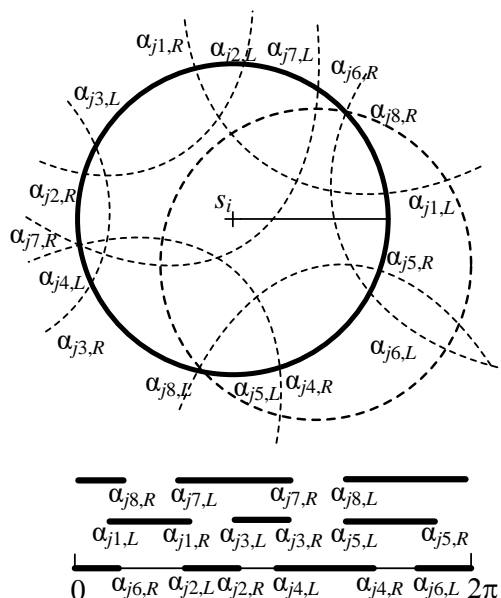


Рисунок 3 – Определение части периметра зоны чувствительности сенсора s_i , находящейся в зоне чувствительности соседних с ним сенсоров

Алгоритм предусматривает два случая взаиморасположения датчиков:

- случай 1: периметр зоны чувствительности сенсора s_i лежит вне зоны чувствительности сенсора s_j ;
- случай 2: периметр зоны чувствительности сенсора s_i лежит в зоне чувствительности сенсора s_j (рисунок 4).

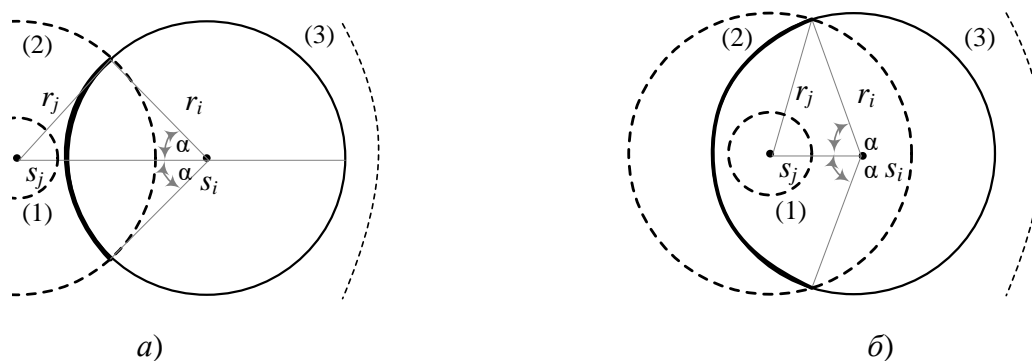


Рисунок 4 – Зоны чувствительности сенсоров s_j и s_i – круговые зоны с различными радиусами (а – случай 1, б – случай 2)

Рассмотренные случаи позволили сделать вывод о том, что любой i -й датчик может быть исключен из сети мониторинга, если периметры соседних с ним датчиков входят в зону чувствительности k датчиков без участия i -го датчика.

Продемонстрировано применения комплексного подхода к решению проблемы оптимизации расположения сенсорных узлов и информационных потоков в сети мониторинга учитывая допустимые границы пространственного искажения сигнала. Размещение сенсоров в сети мониторинга должно быть выполнено таким образом, чтобы посылаемые ими данные приемнику, лежали в пределах заданного допустимого изменения сигнала с учетом условия минимизации энергетических затрат на осуществление сеанса связи. С этой целью поверхность мониторинга разбивается на ячейки Вороного (рисунок 5). Границы ячеек Вороного обозначены красными линиями и представляют границы допустимых искажений сигнала для каждой ячейки. В то время как возможная структура передачи данных обозначена пунктирными линиями и имеет древовидную структуру.

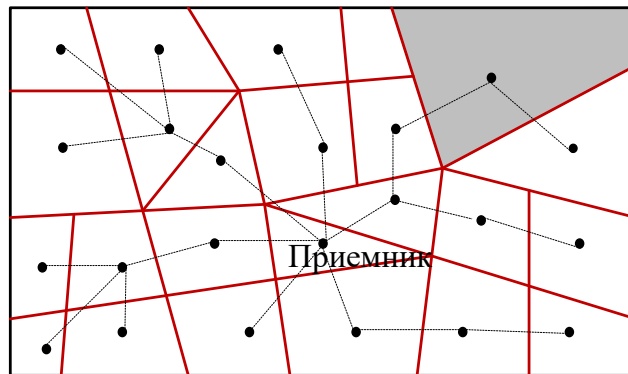


Рисунок 5 – Схема сбора пространственно-распределенных данных в сети мониторинга

За оценку искажения сигнала, восстанавливаемого в приемнике, принята среднеквадратическая ошибка D . Пусть модель одномерной корреляционной пространственно-временной структуры сигнала:

$$E[X(x, t_1)X(x_0, t_2)] = f(|x - x_0|, |t_1 - t_2|) = \exp(-\alpha(x_1 - x_2)^2 + \beta^2(t_1 - t_2)^2), \quad (2)$$

где x_0 – координата сенсора, принимающего сигнал от объекта, расположенного в точке с координатой x ; $(t_1 - t_2)$ – задержка сигнала на пути распространения от точки x до точки x_0 ; α – константа коэффициента корреляции сигналов; β – константа, масштабирующая ось времени; и известно число отрезков (хопов) при выстраивании маршрута $k = \beta t_k$, где t_k – задержка сигнала датчика при передаче

сигнала из точки x_0 в точку нахождения приемника. Если принять, что задержка на каждом отрезке маршрута постоянна и равна T , то при $t_k=kT$ получено выражение для среднеквадратической ошибки:

$$\begin{aligned} D &= E[(X(x, t_1) - X(x_0, t_1 + kT))^2] = \\ &= E[X(x, t_1)^2] + E[X(x_0, t_1 + kT)^2] - 2E[X(x, t_1)X(x_0, t_1 + kT)] = 2 - 2f(|x - x_0, t_1 + kT|) = \\ &= 2 - 2\exp(-\alpha((x_1 - x_2)^2 + (\beta kT)^2)). \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (4) оценивает искажение сигнала k -го сенсорного узла, расположенного в точке $x_k = 0$, при восстановлении на узле назначения:

$$D_k(N) = 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - f(x, kT)) dx, \quad (4)$$

где L – протяженность одномерной сети мониторинга; N – количество сенсорных узлов.

Выражение (5) оценивает искажение сигналов всех сенсорных узлов, восстанавливаемых в узле назначения:

$$D(N) = \sum_{k=0}^{N-1} 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - f(x, kT)) dx = \sum_{k=0}^{N-1} 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - \exp(-\alpha((x_1 - x_2)^2 + (\beta kT)^2)) dx. \quad (5)$$

Решение уравнения $D'(N) = 0$ позволяет найти оптимальное с точки зрения минимизации пространственно-временных искажений значение количества сенсоров в сети мониторинга.

Построена зависимость оптимального количества сенсорных узлов в одноранговой БСС как функция параметра протяженности БСС для случаев сильной и слабой корреляции данных.

В третьей главе разработан алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

При поиске оптимального маршрута учтено, что маршрутов доставки данных от И-узла к А-узлу несколько.

Показано, что специальные протоколы БСС занимаются определением маршрутов передачи данных. Алгоритмы этих протоколов схожи с алгоритмами маршрутизации в компьютерных сетях, но параметры, учитываемые для построения маршрутов в БСС являются другими.

В главе рассмотрены: алгоритм маршрутизации по требованию на основе вектора расстояний (AODV) и алгоритм маршрутизации на основе иерархии

адресов. Анализ этих протоколов показал, что выбор маршрута доставки данных основывается на количестве хопов от И-узла к А-узлу. В то же время для БСС критически важной является характеристика уровня остаточной энергии узлов маршрута и традиционные для компьютерных сетей характеристики – длина очереди, производительность узла, состояние узла, загрузка, которые также влияют на время доставки данных, как характеристики качества БСС.

Рассмотрены два метода построения маршрутных таблиц: вероятностный (рисунок 6) и детерминированный (рисунок 7). Вероятностный метод подразумевает наличие коллизий при отправке узлами пакетов с информацией, необходимой для построения таблицы маршрутизации. Детерминированный метод подразумевает отсутствие возникновения коллизий, поскольку для опроса каждого узла выделяется свое временное окно, что в итоге гарантирует опрос всех узлов и построение дерева всех возможных маршрутов от любого И-узла до любого А-узла.

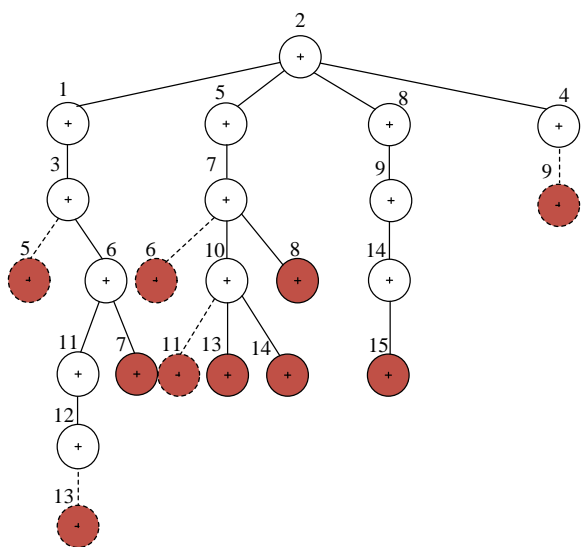


Рисунок 6 – Дерево маршрутов, построенных вероятностным методом от узла-маршрутизатора 2

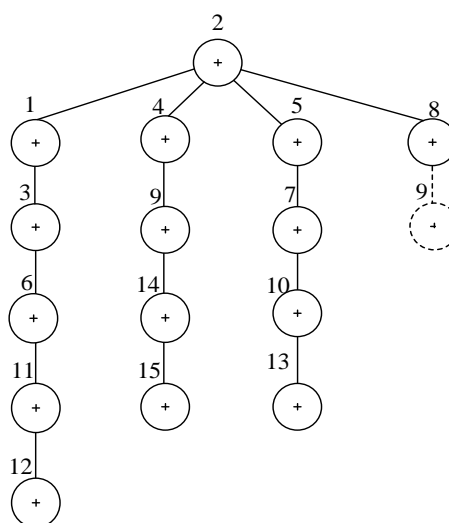


Рисунок 7 – Дерево маршрутов, построенных детерминированным методом от узла-маршрутизатора 2

Предложено использовать аппарата нечеткой логики для выбора оптимального маршрута с учетом важных характеристик узлов построения маршрута. Контроллер нечеткой логики предложено размещать на каждом узле в виде программного обеспечения или центральном узле, который периодически после каждого обновления информации о характеристиках узлов БСС передает ее широковещательной рассылкой на все узлы БСС.

Рассмотрена структура контроллера нечеткой логики на уровне фаззификации, функций принадлежности, лингвистической модели, нечеткого вывода и дефаззификации.

Алгоритм поиска лучшего и резервных маршрутов включает две стадии применения контроллера нечеткой логики: 1-я – оценка рейтинга сенсорных узлов, на которых строится маршрут доставки данных и 2-я – оценка рейтинга маршрутов, построенных от И-узла к А-узлу.

В оценке рейтинга узла участвуют следующие характеристики: производительность сенсорного узла – нечеткое множество z_1 с терминами {"малая", "средняя", "высокая"}; пропускная способность канала – $z_2 = {"низкий", "средний", "высокий"};$ уровень остаточной энергии – $z_3 = {"низкая", "средняя", "высокая"};$ коэффициент загрузки сенсорного узла – $z_4 = {"низкий", "средний", "высокий"};$ состояние узла (активность/сон) – $z_5 = {"активный", "сон"};$ длина очереди на обслуживание в узле – $z_6 = {"длинная", "средняя", "малая", "отсутствует"};$ число хопов от И-узла к А-узлу $z_7 = {"большое", "среднее", "малое"}.$

Введено конечное число функций принадлежности для преобразования множеств входных характеристик сенсорных узлов маршрутов в нечеткие множества.

Логическая модель задана правилом Мамдани:

$$\mu_R(R) = \max_{k=1,n} \left\{ \min \left[\mu_1(z_1)_k, \mu_2(z_2)_k, \mu_3(z_3)_k, \mu_4(z_4)_k, \mu_5(z_5)_k, \mu_6(z_6)_k, \mu_7(z_7)_k \right] \right\}, \quad (6)$$

где n – количество правил логической модели, $n = 3^5 + 2^1 + 4^1 = 249$: z_1, z_2, z_3, z_4 и z_7 имеют по три термина, z_5 имеет два термина, z_6 имеет четыре термина.

Нечеткий вывод каждого правила представляет собой лингвистическую переменную "рейтинг маршрута" R , множество значений которой состоит из пяти термов: $R = {"очень высокий", "высокий", "средний", "низкий", "очень низкий"}.$ Рейтинг маршрута вычисляется в результате дефаззификации выходного нечеткого множества методом центраида.

Приведены сценарии выбора маршрутов БСС при разных значениях характеристик узлов БСС, демонстрирующих работоспособность предложенного метода, основанного на аппарате нечеткой логики.

Новизна предложенного алгоритма выбора маршрута доставки данных в отличие от известных позволяет на этапе установления соединения формировать

несколько маршрутов, что позволяет обеспечивать устойчивость БСС в условиях ее динамических свойств.

В четвертой главе выполнено имитационное моделирование самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

Предложена математическая модель оценивания вероятностно-временных характеристик доставки данных в одноранговой БСС с ячеистой топологией.

Показано, что установление сквозного соединения от И-узла к А-узлу, несмотря на подвижность узлов и их состояние, позволяет обеспечить гарантированную доставку данных.

Установление соединения начинается с посылки пакета ROUTE REQUEST, при получении которого на каждом узле запускается работа контроллера нечеткой логики и формируется множество альтернативных маршрутов доставки данных (рисунок 8).

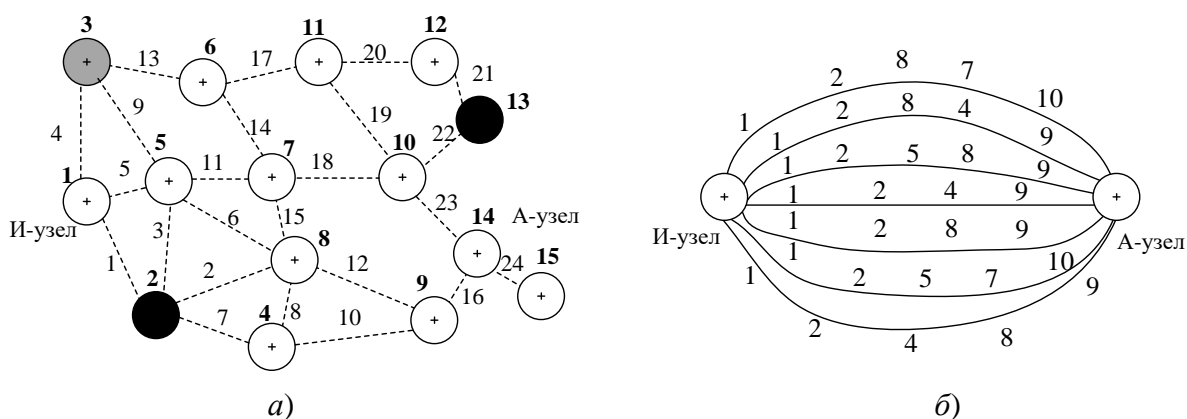


Рисунок 8 – Формирование маршрутов доставки данных: *a* – БСС; *б* – множество альтернативных маршрутов между И-узлом и А-узлом

Таким образом, время доставки данных в одноранговой БСС с ячеистой топологией оценивается по (6) и (7).

$$T = t_d + t_m + \sum_{i=1}^n (t_i^{\text{обр}} + t_i^{\text{пер}}), \quad (6)$$

где t_d – время, необходимое на подготовку данных; t_m – время построения маршрута; n – число хопов от И-узла к А-узлу; $t_i^{\text{обр}}$ – время, которое i -й узел тратит обработку пакета; $t_i^{\text{пер}}$ – время, которое требуется для передачи пакета от i -го узла.

Все составляющие выражения (6) являются детерминированными, только величина t_m является случайной из-за возникновения коллизий и поиска нового

маршрута.

Время построения маршрута t_M может быть найдено выражением

$$t_M = \sum_{i=1}^n t_i^{\text{пер}} + n_{\text{att}} t_{\text{out}}, \quad (7)$$

где n_{att} – число попыток установления доступа к соседним узлам; t_{out} – продолжительность тайм-аута.

Для оценивания вероятностно-временных характеристик доставки данных по (6) и (7) разработана имитационная модель установления сквозного соединения по оптимальному маршруту от И-узла к А-узлу для последующей передачи данных.

Рассмотрены особенности генерации некоторых исходных данных имитационной модели построения маршрутов БСС: состояния узлов БСС, коэффициента загрузки узлов и длины очереди на обслуживание в узлах БСС. Остальные характеристики узлов и каналов задаются как технические характеристики.

Приведено описание имитационной модели, позволяющей:

- во-первых, создать сеть с заданной топологией взаимодействия сетевых узлов;
- во-вторых, проводить имитационный эксперимент на беспроводной сенсорной сети с целью оценки вероятностно-временных характеристик доставки пакетов данных.

Создание определенной БСС реализуется в редакторе структуры сети и визуализируется в виде графа. Для каждого узла задается его производительность и вероятность перехода в спящий режим. Для каждого канала связи задается радиус действия сигнала, скорость передачи данных и вероятность разрыва соединения.

Выполнение имитационного эксперимента на модели БСС заключается в том, что в каждой новой попытке установить соединение между выбранными узлами источника и адресата определяется число сетевых узлов и каналов связи, через которые не может быть установлено соединение. Это либо «спящие» узлы, либо разорванные связи.

При установленном сквозном соединении – маршрута доставки фиксируется время t_M и к нему добавляется время доставки самих данных, вычисляемое по (8) и (9).

$$t_i^{\text{обр}} = \sum_{i=1}^n \frac{l}{S_i}, \quad (8)$$

$$t_i^{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l}{\Lambda_i}, \quad (9)$$

где l – длина пакета, [бит]; S_i – производительность i -го узла маршрута, [пакетов/с]; n – число узлов в маршруте; Λ_i – пропускная способность i -го канала, [пакетов/с].

После очередной отправки данных по маршруту уровень остаточной энергии каждого узла маршрута корректируется согласно выражению

$$E^- = E^+ - (E'l + E''ld^2), \quad (10)$$

где E^+ и E^- – уровень остаточной энергии узла до и после отправки данных соответственно; E' – энергия, необходимая для генерации одного бита, Дж/бит; E'' – энергия необходимая для передачи одного бита Дж/бит/м²; d – расстояние до соседнего узла маршрута.

Для получения устойчивых результатов оценки вероятностно-временных характеристик доставки данных эксперимент повторяется несколько раз при заданной топологии БСС.

По результатам имитационного эксперимента построены зависимости времени доставки данных от:

- количества недоступных каналов;
- количества попыток установления соединения с соседним узлом;
- серии эксперимента.

Анализ результатов эксперимента на модели показал, что с увеличением количества недоступных каналов увеличивается время доставки данных из-за необходимости поиска альтернативных маршрутов; для разных приоритетов отправки пакетов время доставки разное, что создает альтернативу выбора маршрута; при приближении числа недоступных каналов к 50% от общего числа каналов на всей БСС время доставки данных сходится к одному значению для разных приоритетов отправки данных, поскольку возможности по поиску альтернативных маршрутов сужаются.

Количество попыток разрешения коллизий также влияет на время доставки данных: время растёт с увеличением числа попыток, но в то же время увеличивает вероятность доставки данных.

Значения измеренного времени доставки данных в каждой серии эксперимента показывают, что дисперсия этой характеристики не превышает $1,4 \cdot 10^{-3}$.

Построены зависимости вероятности доставки данных от:

- количества недоступных каналов;
- количества «спящих» узлов;
- количества попыток установления соединения с соседним узлом.

Результаты эксперимента показали, что вероятность доставки данных будет снижаться с увеличением количества недоступных каналов и «спящих» узлов. С увеличением количества недоступных каналов до 50% от их общего числа вероятность доставки данных падает до нуля. При числе «спящих» узлов более 14% от их общего числа вероятность построения маршрута также падает до нуля.

Эксперимент на модели позволяет установить допустимое число попыток установления соединения с соседним узлом, при котором вероятность доставки данных продолжает расти. Таким образом эксперимент на модели устанавливает предельное количество «спящих» узлов и недоступных каналов, меняющих структуру БСС, но позволяющих сохранить работоспособность БСС, а также количество попыток установления соединения с соседними узлами, приводящее к гарантированной доставке данных при заданной топологии БСС.

Имитационная модель также позволяет оценить условную вероятность – вероятность доставки при условии, что время доставки меньше допустимого. Построены зависимости количества построенных маршрутов от допустимого времени доставки данных при разных приоритетах отправки данных и зависимости вероятности и условной вероятности доставки данных от числа недоступных каналов.

Поскольку на каждом узле работает контроллер нечеткой логики, то после каждой отправки пакета рейтинги маршрутов будут меняться. Таким образом, с течением времени БСС станет неработоспособной из-за потери энергии. В работе приведены сравнительные характеристики времени «жизни» БСС при реализации маршрутизации только по числу хопов и по предложенному в диссертации алгоритму маршрутизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная задача, сформулированная в диссертационной работе как разработка моделей и алгоритмов, обеспечивающих качественный сервис по доставке данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией решена с получением следующих результатов:

1. Предложено решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов на заданной территории – задача создания сплошного сенсорного поля.

Решение задачи выполнено по критериям полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети. Размещаемые датчики имеют разную физическую природу (разный радиус действия). Для таких условий, решение предложено впервые и позволяет определить геометрию расположения датчиков различной физической природы на заданной территории по критерию получения максимума информации при допустимых границах искажения сигнала.

2. Разработан новый алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

Предложено расширить возможности протокола AODV путем фиксации ряда дополнительных характеристик, таких как загрузка узлов, уровень остаточной энергии узлов, наличие очереди на обслуживание, статус узлов и других. Работа алгоритма основана на работе контроллера нечеткой логики для определения рейтинга маршрутов на основе комплексного показателя характеристик узлов, на которых построены маршруты. Маршрут с наивысшим рейтингом выбирается для доставки данных, остальные маршруты с высоким рейтингом назначаются резервными.

3. Разработана имитационная модель самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией.

В имитационной модели учтены особенности инфокоммуникационных сетей данного класса: рассмотрены особенности моделирования состояний узлов БСС, загрузки узлов и длины очереди на обслуживание; уровень остаточной энергии узла снижается после каждой ретрансляции пакета данных. Перечисленные особенности влияют на выбор маршрута доставки данных.

С помощью имитационного эксперимента на модели БСС с заданными параметрами и внешними воздействиями оценить вероятностно-временные характеристики доставки данных узлу-адресату.

Разработанная имитационная модель является средством для исследования работы данного класса инфокоммуникационных сетей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Миклуш В.А. Микроконтроллеры и их применение в гидрологических и гидрофизических информационно-измерительных системах / К.Б. Бойков, В.А. Большаков, В.А. Миклуш // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 9. – С. 113-124.
2. Миклуш В.А. Алгоритм размещения датчиков системы экологического мониторинга / Т.М. Татарникова, П.Ю. Богданов, В.А. Миклуш // Телекоммуникации. – 2022. – № 3. – С. 2-9.
3. Миклуш В.А. Комплексная система экологического мониторинга акватории морского порта / Т.М. Татарникова, В.А. Миклуш, П.Ю. Богданов // Информация и космос. – 2022. – №1. – С. 88-93.
4. Миклуш В.А. Решение задачи расположения датчиков различной физической природы при организации беспроводной сенсорной сети с топологией Mesh / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76, № 12. – С. 15–20.
5. Миклуш В.А. Оценка показателей качества обслуживания беспроводных сенсорных сетей / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, В.А. Миклуш, С.В. Рудых // Информация и Космос. – 2022. – № 4. – С.21-27.
6. Миклуш В.А. Алгоритм маршрутизации самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей на базе контроллера нечеткой логики / В.А. Миклуш, С.В. Рудых, Т.М. Татарникова, Ю.Н. Андрюшечкин // Морская радиоэлектроника. – 2023 – Т. 83, № 1. – С. 40-47.
7. Миклуш В.А. Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 20-26.
8. Миклуш В.А. Постановка задачи формирования множества альтернативных маршрутов mesh-сети / В.А. Миклуш // Успехи современной радиоэлектроники. – 2023. – Т. 77, № 8. – С. 5-10.
9. Миклуш В.А. Применение технологии RFID в системе мониторинга и управления сложными производственными процессами судостроительного предприятия / В.А. Миклуш, С.В. Миклуш, Т.М. Татарникова // Успехи современной радиоэлектроники. – 2023. – Т. 77, № 8. – С. 11-17.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности:

10. Миклуш В.А. Программа создания сплошного сенсорного поля на территории с естественными препятствиями / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022665779, 22.08.2022.

11. Миклуш В.А. Программа размещения базовых станций в самоорганизованной беспроводной сенсорной сети / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022665780, 22.08.2022.

12. Миклуш В.А. Имитационная модель установления соединения в самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети /В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022665781, 22.08.2022.

Публикации изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

13. Miklush V Information support in environmental monitoring systems / E. Kraeva, V. Miklush, I. Palkin, T. Tatarnikova, A. Kunturov // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector". – 2020. – P. 012015.

14. Miklush V.A. Organization of environmental monitoring of the port water area by processing an anti-interference signal from a vessel traffic control system / V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova, I.A. Sikarev //Automatic Control and Computer Sciences. – 2021. – V. 55, no. 8. – P. 999-1004.

15. Miklush V.A. Model of a secure data transmission channel of the sea surface monitoring system / T.V. Timochkina, V.A. Miklush, E.V. Kraeva // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "EarthScience". – 2020. – P. 032049.

Публикации в других изданиях и конференциях:

16. Миклуш В.А. О возможности построения интеллектуальной технологии управления процессом обеспечения экологической безопасности на базе геоинформационных систем / В.А. Миклуш, Н.Н. Попов, В.Г. Бурлов // Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. – 2017. – С. 237-238.

17. Миклуш В.А. Модель интеллектуального управления обеспечением экологической безопасности на базе ГИС с учетом квалификации лица, принимающего решение / В.Г. Бурлов, Н.Н. Попов, В.А. Миклуш // Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. – 2018. – С. 89-91.

18. Миклуш В.А. Способы взаимодействия устройств интернета вещей / В.А. Миклуш, А.А. Базарова, Т.В. Цап // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2019. – № 4(36). – С. 20-23.

19. Миклуш В.А. Безопасность интернета вещей / Е.В. Краева, В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов конференций: Санкт-Петербургской международной конференции и Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 203-207.

20. Миклуш В.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для сбора сведений об окружающей среде / Миклуш В.А. Сашенко К.О. // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. Материалы круглых столов VI межрегиональной научно-практической конференции. – Севастополь, 2020. – С. 74-75.

21. Миклуш В.А. Использование системы управления движением судов в многосенсорных системах мониторинга морской поверхности / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции / Отв. редактор К.А. Маковейчук. – 2020. – С. 195-199.

22. Миклуш В.А. Методы и средства безопасного функционирования интернета вещей / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, Е.В. Краева // Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 240.

23. Миклуш В.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в предупреждении техногенных катастроф и мониторинге их последствий / К.О. Сашенко, В.А. Миклуш, Е.В. Краева // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2020. – С. 633-634.

24. Миклуш В.А. Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, проводимых в РГГМУ / П.П. Бескид, П.Ю. Богданов, В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, Е.А. Чернецова, А.Д. Шишкин // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 60. – С. 371-391.

25. Миклуш В.А. Организация экологического мониторинга акватории порта посредством обработки помехозащищенного сигнала системы управления движением судов / В.А. Миклуш, И.А. Сикарев, Т.М. Татарникова // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2020. – № 4. – С. 72-78.

26. Миклуш В.А. Решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, И.И. Палкин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 5. – С. 404-411.

27. Миклуш В.А. Дистанционный мониторинг нефтяных разливов в акватории порта средствами радиолокационных систем / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Гидрометеорология и экология. – 2022. – №66. – С. 81-92.

28. Миклуш В.А. Информационно-измерительная система дистанционного зондирования акватории порта / В.А. Миклуш // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах 22. Сборник докладов Второй Международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 325-329.

29. Миклуш В.А. Выбор и оптимизация расположения датчиков по критерию получения максимума информации / В.А. Миклуш, С.В. Миклуш // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах' 23. Сборник докладов Третьей Международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 109-115.

30. Миклуш В.А. Выбор маршрута доставки данных, основанный на применении математической теории нечетких множеств / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах' 23. Сборник докладов Третьей Международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 116-125.