

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи

Миклуш Виктория Александровна

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

Специальность – 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ЯЧЕЙСТОЙ ТОПОЛОГИЕЙ.....	12
1.1. Базовые элементы самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети.....	12
1.2. Характеристики показателей качества БСС.....	16
1.3. Стандарты беспроводных сенсорных сетей .....	24
1.3.1. Стандарт IEEE 802.15.4 .....	24
1.3.2. Стандарт ZigBee .....	28
1.3.3. Топологии беспроводных сенсорных сетей .....	29
1.4. Методы маршрутизации в БСС.....	31
1.5. Постановка задачи исследования.....	35
Выводы по первой главе.....	37
2. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ПО КРИТЕРИЮ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМУМА ИНФОРМАЦИИ .....	39
2.1 Постановка задачи размещения.....	39
2.2. Определение зоны покрытия датчиками зоны ответственности сети мониторинга.....	42
2.3 Минимизации зоны нечувствительности сети мониторинга .....	46
2.4. Вероятностная модель покрытия зоны ответственности системы мониторинга зонами чувствительности сенсоров .....	52
2.5. Алгоритм совместной оптимизации расположения сенсоров и информационных поток в сети мониторинга при допустимых границах искажения сигнала .....	55
Выводы по второй главе .....	72
3. АЛГОРИТМ МАШРУТИЗАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ .....	74
3.1. Протоколы маршрутизации для одноранговых БСС.....	74
3.1.1. Алгоритм маршрутизации по требованию на основе вектора расстояний.....	74
3.1.2. Алгоритм маршрутизации на основе иерархии адресов.....	80
3.2. Построение таблицы маршрутизации.....	81

3.3. Метод маршрутизации, основанный на контроллере нечеткой логики .....	87
3.3.1. Структура контроллера нечеткой логики .....	89
3.3.2. Алгоритмы нечеткого вывода .....	96
3.3.3. Расширение протокола AODV .....	98
Выводы по третьей главе .....	105
<b>4. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ ДАННЫХ .....</b>	<b>107</b>
4.1. Математическая модель оценки времени доставки .....	107
4.2. Особенности генерации некоторых исходных данных имитационной модели .....	110
3.3. Описание имитационной модели построения маршрута и .....	113
4.4. Постановка задачи эксперимента по оценке времени доставки данных .....	118
Выводы по четвертой главе .....	125
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>126</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>140</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>142</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Беспроводные сенсорные сети (БСС Wireless Sensor Network – WSN) являются самым быстро развивающимся сектором инфокоммуникационных систем. Первые сенсорные сети имели узконаправленное назначение – военное дело [15]. В настоящее время это новый тип сетей, которые нашли широкое применение в различных отраслях экономики. Современные БСС используются для мониторинга параметров окружающей среды, автоматизации производства, контроля территорий, внешних параметров объектов мониторинга и других важных задач. Благодаря БСС значительно расширился спектр предоставляемых информационных услуг при управлении этими процессами [19, 69,79].

Исторически первой беспроводной сенсорной сетью считается созданная в 1950-х годах США для военных целей сеть SOSUS (Sound Surveillance System). Функции беспроводных узлов выполняли гидрофоны – погружные акустические датчики. В настоящее время сеть SOSUS выполняет мониторинговые функции – наблюдение за подводным миром дикой природы и вулканическими процессами. Исследования БСС как инфокоммуникационной технологии начались с 1980-х годов с появлением распределенных сенсорных сетей, изучением и разработкой которых занялись многие ведущие университеты и компании мира, такие как Массачусетский технологический институт, IBM, Bell Labs, Crossbow Technology, Dust Networks и другие [93]. Активное развитие современных беспроводных сенсорных сетей в части технологий передачи данных, алгоритмов маршрутизации и взаимодействия узлов БСС, относят к 2000-м годам: принят стандарт IEEE 802.15.x, устанавливающий структуру беспроводных каналов с низким энергопотреблением и рекомендации RFC 4944, 4919, обеспечивающие интеграцию БСС малых размеров с IP-сетями по протоколу

IPv6 с низким потреблением энергии [99]. Исследования активно продолжаются и в настоящее время [58].

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 [9]. Готовые платформы под определенные классы задач отсутствуют, то есть варианты реализации БСС зависят от конкретных требований к функционалу сенсорных узлов и качеству предоставляемого БСС сервиса [2,20].

Таким образом, можно сказать, что БСС находятся на этапе интенсивного формирования технологии. В силу особенных свойств БСС: самоорганизации, то есть подвижности узлов и отсутствия фиксированной инфраструктуры и централизованного управления, 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 [1,29,53]. Решение этой задачи распадается на три частные взаимосвязанные задачи:

Во-первых, доставка данных выполняется по установленному соединению от источника к адресату через активные (не находящиеся в режиме «сна») транзитные узлы. Соответственно каждый транзитный узел, должен находиться в зоне чувствительности своего ближайшего соседа – тоже транзитного узла [16]. 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 [24,64]. Таким образом, необходимы алгоритмы

размещения сенсорных узлов, способствующие появлению нескольких соединений от узла источника до узла адресата.

В-третьих, показатели, характеризующие качество обслуживания и не имеющие значения для проводных сетей, стали актуальными и для БСС. Данное обстоятельство требует определения показателей качества БСС, причем для летающих сенсорных сетей – это одни значения показателей качества, для медицинских сенсорных сетей – другие, для транспортных сенсорных сетей – третьи и т.д. [60,66,82]. Таким образом, под качеством обслуживания понимается интегральный показатель, характеризующий выполнение беспроводной сенсорной сетью основной функции – передачи собранных и обработанных данных в условиях энергетических и вычислительных ограничений возможностей узлов, их мобильности (подвижности), протоколов передачи данных и других [85]. В частности, для БСС приоритетными становятся следующие характеристики, влияющие на качество обслуживания: устойчивость к изменению топологии связей узлов БСС (самоорганизация); время жизни БСС; площадь покрытия заданной области; время доставки данных; пропускная способность БСС; вероятность потери данных [80,89]. Таким образом, необходимы модели оценки перечисленных характеристик проекта БСС с такими параметрами узлов и соединений, алгоритмов маршрутизации, площади покрытия и т.д., которые соответствуют требуемому качеству обслуживания.

**Степень разработанности темы.** 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.

**Объект исследования** - самоорганизующиеся беспроводные сенсорные сети с ячеистой топологией.

**Предмет исследования** - модели и алгоритмы для самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей с ячеистой топологией, обеспечивающих гарантированную доставку данных.

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

**Цель диссертационной работы и задачи исследования.** 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 результатов работы.**

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.

**Теоретическая и практическая ценность** 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.

*Внедрение результатов диссертационной работы* осуществлено в АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета»» при выполнении специальной части ОКР на тему «Автоматизированная система управления подготовкой и пуском РКН на СК 373УТ74. Программное обеспечение контроля аппаратно-программных средств». Также результаты диссертации были использованы и внедрены в учебный процесс кафедры информационных систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» при 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». Внедрение результатов диссертации подтверждено актами (Приложение А).

**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 положения, 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 апробация результатов** подтверждается корректным применением математического аппарата, полученными зависимостями вероятностно-временных характеристик доставки данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях. Результаты исследования не противоречат ранее полученным данным, опубликованным в открытых источниках. Выносимые на защиту результаты опубликованы в рецензируемых изданиях из списка ВАК и индексируемых в базе данных Scopus.

Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVI всероссийской научной конференции "Нейрокомпьютеры и их применение", г. Москва, 13 марта 2018 г.; XI Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2019)», 23-25 октября 2019 г.; XVII Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2020)», 28-30 октября 2020 г.; Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского

государственного гидрометеорологического университета «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2020 г.; VI межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий», г. Севастополь, 22–26 сентября 2020 г.; V Международной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии в моделировании и управлении», г. Ялта, 20-22 мая 2020 г., кафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), 2018-2020 гг. и Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП), 2021-2023 гг.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Содержание диссертации соответствует п.1: Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций и п.18: Разработка научно-технических основ создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Проведенные исследования соответствуют формуле специальности.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 30 печатных работах, в том числе в 9 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 3 работы опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 3 свидетельствами о регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б), 15 в других изданиях и материалах конференций.

**Личный вклад автора** диссертационной работы заключается в:

– разработке модели оптимального расположения сенсорных узлов разной физической природы на заданной территории;

- построении зависимости оптимального количества сенсорных узлов в одноранговой беспроводной сенсорной сети как функция параметра протяженности сети для случаев сильной и слабой корреляции данных;
- разработке алгоритма совместной оптимизации расположения сенсоров и информационных потоков в беспроводной сенсорной сети в допустимых границах искажения сигнала;
- обосновании критериев выбора маршрутов доставки данных, учитывающих свойства беспроводной сенсорной сети и позволяющих улучшить значения вероятностно-временных характеристик доставки данных;
- предложении алгоритма выбора маршрутов беспроводной сенсорной сети, основанного на аппарате нечеткой логики;
- построении имитационной модели самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией;
- проведении серии экспериментов на модели беспроводной сенсорной сети с заданными параметрами и внешними воздействиями по оценке времени доставки данных.

С 2021 по 2023 годы соискатель выступала с докладами на научных российских и международных конференциях. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях.

# 1. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ЯЧЕЙСТОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Концептуальную модель самоорганизующейся БСС представим на уровне описания узлов, свойств сети, основных характеристик оценки качества сети и алгоритмов маршрутизации.

## 1.1. Базовые элементы самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети

Термин «сенсорная сеть» является устоявшимся термином, обозначающим распределенную, самоорганизующуюся, устойчивую к отказу сеть из необслуживаемых, и не требующих специальной установки устройств [3,12,25].

Основными элементом БСС являются сенсоры (сенсорные устройства, СУ) – это устройства, выполняющие три функции: измерительную, вычислительную и коммуникационную. Сенсорные устройства являются посредниками между физическими процессами, происходящими в окружающей среде и цифровым представлением этих процессов в виде показаний [17,23,57].

Сенсорное устройство представляет собой плату с интегрированными в нее блоком устройства датчиков, радиомодемом, блоком питания, интерфейсным блоком и опционально – блоком визуализации и блоком ввода [22]. Общий вид структуры СУ приведен на рисунке 1.1.

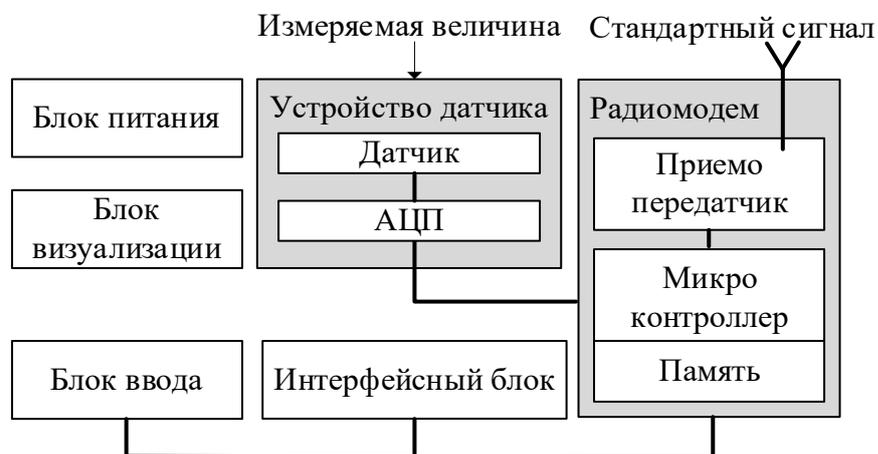


Рисунок 1.1 – Структура сенсорного устройства

В блоке устройства датчиков могут использоваться самые разные датчики, например, температуры, давления, влажности, освещенности и другие, и аналогово-цифровой преобразователь для преобразования сигнала датчика в цифровой код [55,70,78].

Радиомодем включает приемопередатчик и микроконтроллер с памятью (ОЗУ, Flash, ПЗУ, EEPROM). Микроконтроллер выполняет функции нормализации сигнала, отбраковка ошибочных значений, линеаризация и фильтрация сигнала (если необходимо); и преобразование измеренного значения в унифицированный сигнал [8].

Блок питания обеспечивает работу СУ. Также может быть интегрирована дополнительная схема для питания от внешнего источника [3].

Блок визуализации необходим для отображения текущего состояния устройства, например, координаты позиционирования СУ, уровень остаточной энергии и т.п. [79]

Интерфейсный блок включает порты ввода/вывода, например, программирования или подключения внешнего датчика [54].

Блок ввода необходим для ввода или изменения режимов работы, рестарта СУ и т.д.

На СУ устанавливается специальное программное обеспечение, с помощью которого они организуют сеть, обмениваются информацией между собой. Операционные системы для узлов сети: Ambient RT, BTnuts, Contiki, LiteOS, MANTIS, MagnetOS, SOS, TinyOS 1.x, TinyOS 2.0 [32].

Для того чтобы получать и отправлять данные, каждый узел оснащен антенной.

Кроме классической структуры СУ, приведенной на рисунке 1.1 существуют и другие, что связано с необходимостью не только функций измерения параметров окружающей среды, но и функций активного действия на объект. Данный активный элемент называется актором [20,97]. Структура актора подобна структуре СУ, только с внешней средой взаимодействует активный элемент, которым управляет специальный контроллер принятия

решения в структуре актора. Также возможна структура с объединением актора и сенсора в один узел.

Координатор – специальное стационарное устройство с функциями управления маршрутами и потоками данных.

Маршрутизатор – специальное стационарное сенсорное устройство, выполняющее функции маршрутизации потоков данных, поступающих от конечных устройств.

Шлюз – специальный сетевой узел, выполняющий функции интерфейса БСС с глобальной сетью Интернет. Данный узел выполняет сопряжение аппаратного обеспечения и программного обеспечения. Шлюз часто объединен с роутером (маршрутизатором), который управляет распределением и конвертацией пакетов в сети. Основная задача маршрутизатора/шлюза – конвертировать протокол между сетями. Сетевой шлюз может принять пакет, сформатированный под один протокол (например, стандарта ZigBee) и конвертировать его в пакет другого протокола (например, стандарта TCP/IP) перед отправкой в сеть Интернет [98]. Эти функции делают шлюз/маршрутизатор интеллектуальным сетевым узлом, архитектура которого приведена на рисунке 1.2 и является высокопроизводительным мультипроцессором.

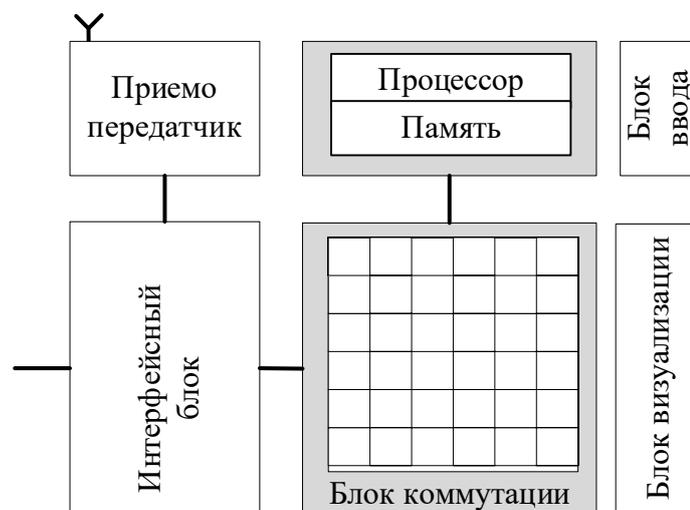


Рисунок 1.2 – Структура Маршрутизатора/Шлюза

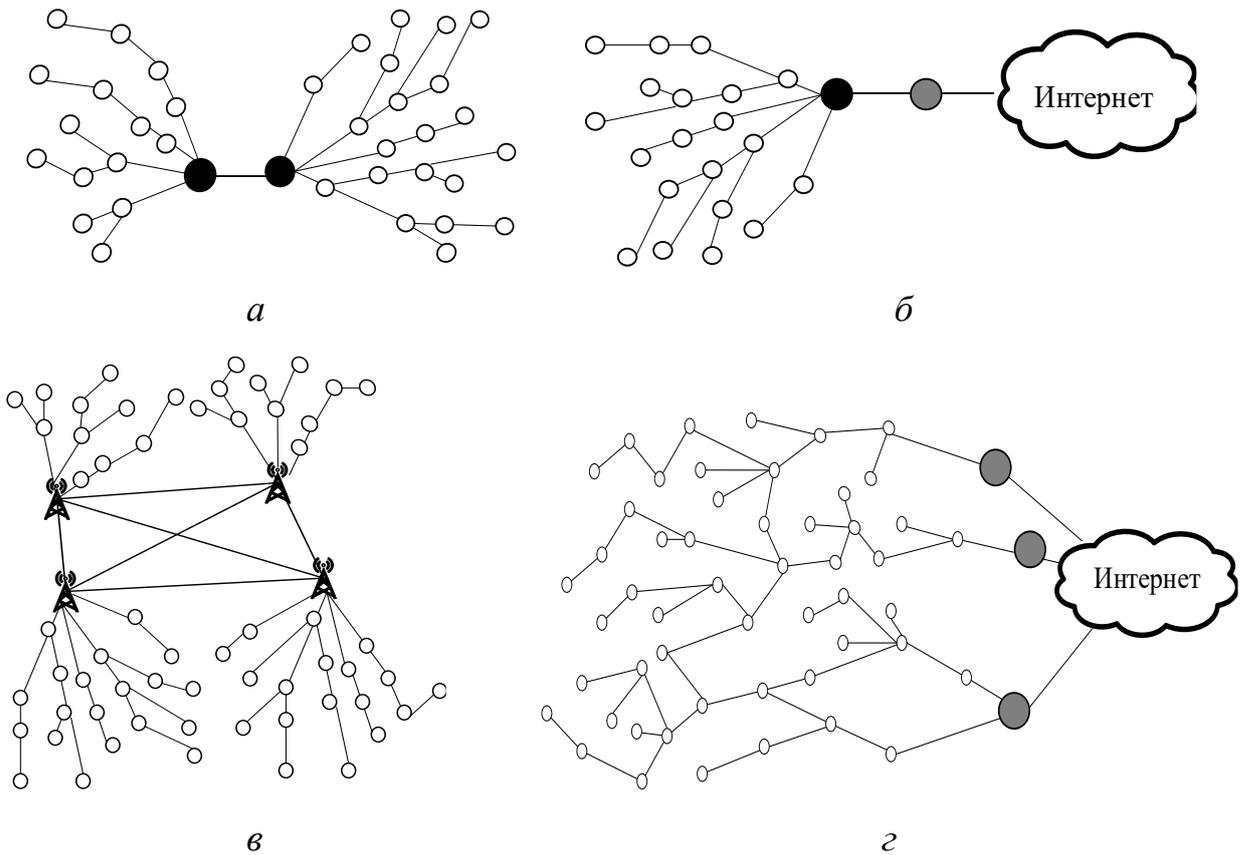
Метаданные, поступающего на маршрутизатор/шлюз пакета анализируются во входном порту узла и согласно коду операции, записанному в них, выбирается цепочка протоколов обработки пакета. При этом, сами данные пакета записываются в общую память маршрутизатора/шлюза. В общей памяти также хранится таблица маршрутизации и другие информационные ресурсы, необходимые для реализации протоколов. В выходном порту к полю данных присоединяется заголовок с новым адресным полем. В маршрутизаторе/шлюзе параллельно обрабатывается несколько пакетов [7].

Базовая станция – это комплекс радиопередающей аппаратуры: ретрансляторы и приемопередатчики, которые располагаются на краю беспроводной сети, базовые станции осуществляют прием и передачу радиосигналов, включая аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование, таким образом обеспечивая связь с абонентскими устройствами, к числу которых также могут относиться беспроводные сенсорные устройства – сотовые телефоны, умные часы и другие. Возможности одной базовой станции стандарта GSM распространяются на одновременное обслуживание до 12 передатчиков, каждый из которых способен взаимодействовать с 8 активными абонентами одновременно [26].

Базовая станция – это не только сама радиомачта с панельными антеннами, но и сопутствующая инфраструктура, на которой располагаются системы питания, климатический шкаф, куда устанавливают блок цифровой обработки, сервер для передачи обработанных пакетов. В зависимости от возложенных функций сервера различают базовую станцию, выполняющую роль маршрутизатора и базовую станцию с ролью координатора.

Координатор – это узел управления сетью: управление политикой безопасности, настройками, подключением новых узлов [39,72].

С учетом функций основных узлов БСС возможны следующие конфигурации организации взаимодействия беспроводных сенсорных сетей между собой и сетью Интернет.



○ - Сенсорное устройство; ● - Маршрутизатор; ▲ - Базовая станция; ● - Шлюз; — - Маршрут

Рисунок 1.3 – Конфигурации организации взаимодействия: а – двух БСС через маршрутизаторы; б – БСС и Интернет; в – нескольких БСС через базовые станции; г – нескольких БСС и Интернет

## 1.2. Характеристики показателей качества БСС

Рассмотрим основные особенности БСС, которые влияют на показатели качества предоставляемого БСС сервиса и рекомендации по допустимым значениям этих показателей.

### *Ограниченные ресурсы*

Известно, что сенсорные узлы в силу технических особенностей их построения имеют ограниченные вычислительные ресурсы, такие как объем памяти, производительность микроконтроллера, мощность приемопередатчика, а также ограниченный ресурс батареи. Поэтому требуются протоколы доставки данных, эффективно расходующие ресурсы

узлов БСС и тем самым способствующие продлению жизненного цикла БСС [62,73]. Специальные микромощные однокристалльные контроллеры потребляют менее 1500 мкВт, типичное значение – 0.5...2.5 Вт, вычислительная мощность – быстроедействие микроконтроллеров, как правило, самое низкое, равно как и объем используемой памяти это 0,1...1К ОЗУ и 1...100 К ПЗУ.

### *Самоорганизация БСС*

Свойство самоорганизации означает, что БСС способна самонастраиваться – узлы автоматически устанавливают маршруты и поддерживают каналы связи, формируя при этом одноранговую сетевую архитектуру с постоянно меняющейся топологией [75,88].

Для самоорганизующихся БСС достаточно одной или нескольких точек базовых станций (маршрутизаторов, шлюзов), поскольку предоставление сервиса по доставке данных осуществляется через соседние узлы [95].

Структуру одноранговой самоорганизующейся БСС образуют большое количество сенсорных узлов, рассосредоточенных на некоторой площади, которую называют площадью покрытия сети, и одна или несколько точек доступа к внешним сетям. При доставке данных от сенсорного устройства, расположенного, например, на границе БСС к устройству, расположенному в центре сети или на маршрутизатор, происходит многоскачковый процесс передачи пакета данных через транзитные узлы – узлы, находящиеся на пути заранее установленного маршрута. При такой организации передачи данных каждый транзитный узел увеличивает площадь действия БСС, а каждое отдельное устройство является маломощным. В самоорганизующейся БСС нет необходимости в централизованной инфраструктуре и функции сетевого администрирования, поскольку БСС обслуживается самими узлами. Данное свойство является главным отличием от проводных и управляемых БСС [71,77].

### *Характер размещения узлов БСС*

Проектирование беспроводной сенсорной сети подразумевает организацию размещения сенсорных узлов в зоне ответственности БСС. В зоне



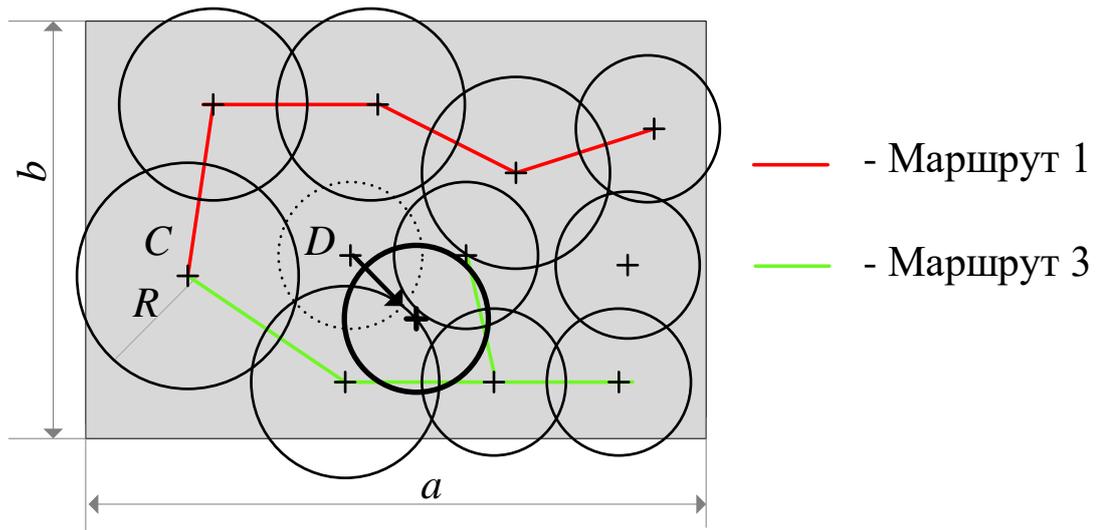


Рисунок 1.5 – Перемещение узлов влияет на перестроение маршрутов

### *Связность узлов*

Связь между соседними узлами осуществляется напрямую по радиоэффиру. Условие, при котором один узел находится в зоне чувствительного другого сенсорного узла, еще не свидетельствует о возможности взаимодействия между ними. Во-первых, у одного из узлов может быть передатчик мощнее, чем у другого, и тогда образуется симплексный канал, по которому узел  $C$  может передавать данные  $D$ , а узел  $D$  не может передавать данные узлу  $C$ . Во-вторых, радиоэффиру могут препятствовать естественные заграждения – здания, сооружения, растительность и другие предметы. [18].

### *Устойчивость к потерям узлов и разрывам соединений*

БСС должна быть устойчивой к изменениям в структуре сети. Такие изменения, как переход некоторых узлов в режим сна, выход из режима сна, перемещение узлов, появление новых узлов сеть не должны повлиять на качество предоставляемого БСС сервиса. Например, если узел  $E$  перейдет в режим сна, то дальнейший маршрут через него не будет построен (рисунок 1.6). Таким образом, для обеспечения качественного сервиса по доставке данных БСС должна быть устойчивой к потерям узлов и разрывам соединений [67].

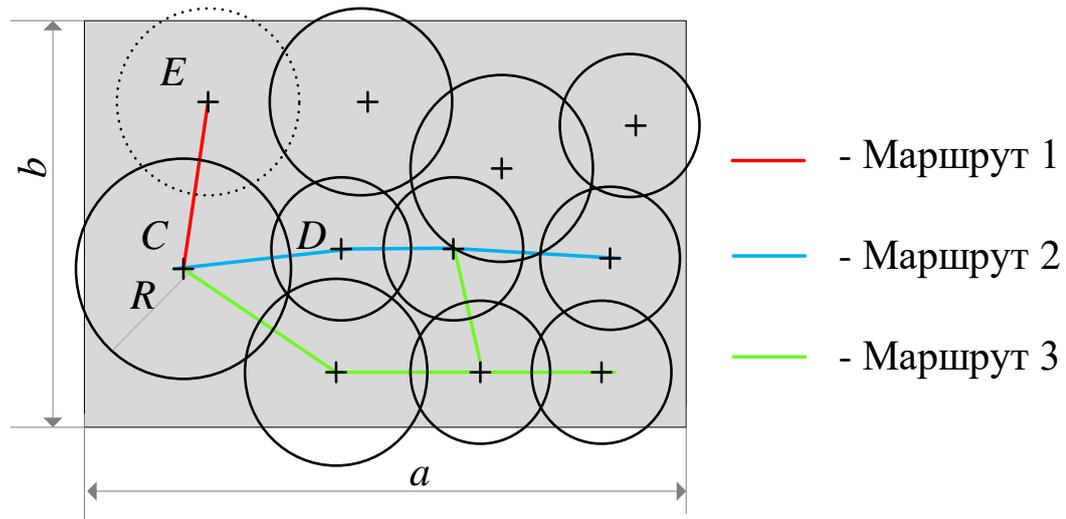


Рисунок 1.6 – Изменение режима узла влияет на перестроение маршрутов

### *Разнообразие приложений БСС*

Известны десятки вариантов применения БСС – умный дом, умный город, умный транспорт и т.д. От варианта применения БСС зависят требования к допустимым значениям показателей качества БСС, которые задаются стандартами и рекомендациями наподобие IEEE 802.15.x, RFC 4944, 4919 или техническим заданием на проект БСС [13,91,94].

### *Модель передачи данных*

Известны три модели передачи данных, реализуемые в БСС [6,28,56]:

– детерминированная модель, при которой данные передаются на базовую станцию (маршрутизатор, шлюз), при которой за один раунд каждому СУ отводится временное окно. При отсутствии данных, СУ отправляет свой идентификатор. Очевидно, что такая модель передачи данных применима в небольших по числу узлов БСС, сосредоточенных в зоне чувствительности базовой станции и для БСС с топологией mesh не подходит (рисунок 1.7,а);

– передача данных по опросу от станции, при которой базовая станция (маршрутизатор, шлюз) отправляет запрос конкретному СУ, в ответ на который СУ отправляет все накопленные данные (рисунок 1.7,б). Модель опроса так же применима для малых по объему БСС, построенных по двухуровневой топологии:

первый уровень – это кластер из СУ с центром на базовой станции (маршрутизаторе), второй уровень – сеть из базовых станций (маршрутизаторов);

– передача данных при возникновении определенного события, при которой СУ отправляет данные при необходимости. Отсутствие управления со стороны базовой станции (маршрутизации, шлюза) приводит к возникновению коллизий – одновременному доступу нескольких узлов к одному и тому же узлу (рисунок 1.7,в).

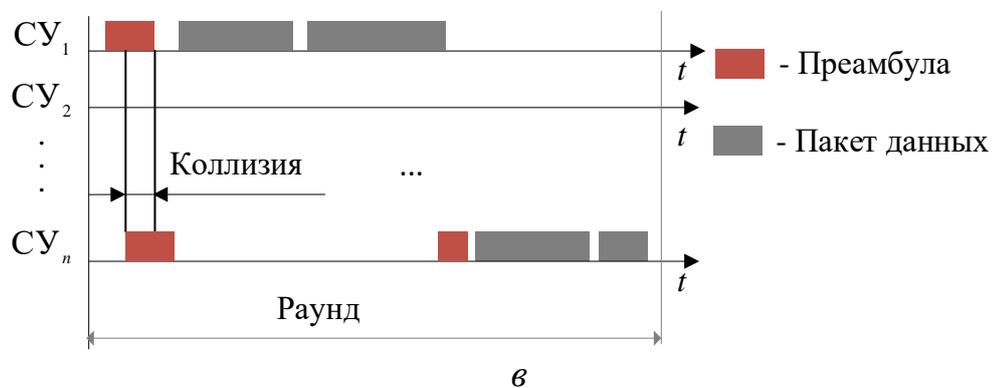
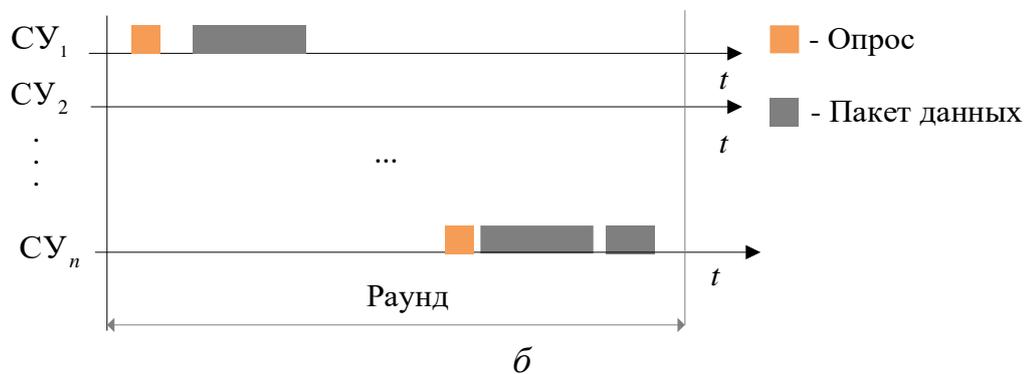
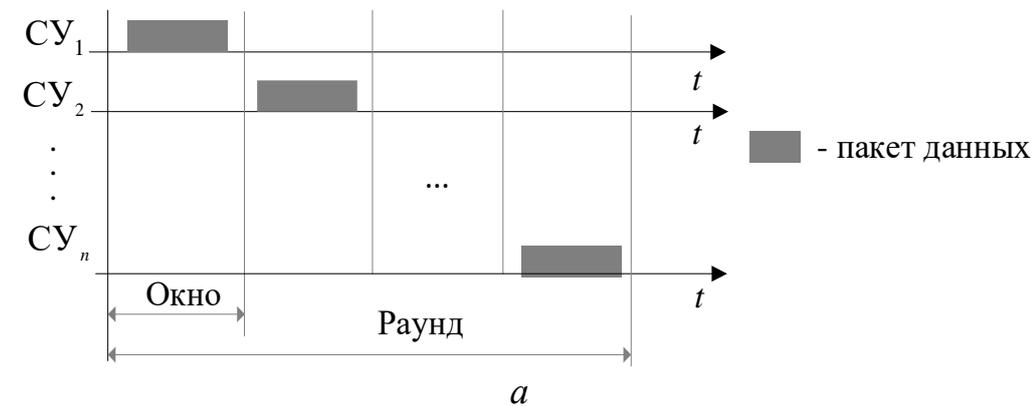


Рисунок 1.7 – Модель передачи данных: *a* – детерминированная; *б* – опроса; *в* – событийная

Модель передачи данных также влияет на значения показателей качества.

Таким образом, качество предоставляемого БСС сервиса по доставке данных является интегральной характеристикой при существующих особенностях БСС.

Качество БСС выражается через значения характеристик, которые должны удовлетворять требуемым значениям качества сервиса, предоставляемого БСС.

Определим вероятностно-временные характеристики (ВВХ) доставки данных, которые влияют на качество сервиса, предоставляемого БСС.

#### *Время доставки данных*

Время доставки данных в БСС с топологией Mesh складывается из времени поиска рационального маршрута доставки данных, продолжительности осуществления скачков между узлами выбранного маршрута и времени обработки данных на узлах маршрута [63,76]. В общем виде время доставки данных можно выразить следующим образом:

$$T = t_d + t_m + \sum_{i=1}^n (t_i^{\text{обр}} + t_i^{\text{пер}}), \quad (1.1)$$

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 (1.1) 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

$$t_M = \sum_{i=1}^n t_i^{\text{пер}} + n_{\text{att}} t_{\text{out}}, \quad (1.2)$$

где  $n_{\text{att}}$  – число попыток установления доступа к соседним узлам;

$t_{\text{out}}$  – продолжительность тайм-аута.

#### *Пропускная способность БСС*

Пропускная способность сети – это характеристика, показывающая отношение предельного количества данных, передаваемых по сети в единицу времени, [бит/с]. На значение пропускной способности БСС влияют технические характеристики узлов и каналов, а также выбранный маршрут доставки данных и масштаб сети. Таким образом, значение пропускной способности БСС может варьироваться от нескольких пакетов в час до сотен пакетов в секунду [14]. Выразим пропускную способность БСС как количество пакетов, обрабатываемых сенсорным узлом в единицу времени:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\bar{L}}, \quad (1.3)$$

где  $\lambda$  – производительность узла, бит/с;

$\bar{L}$  – средняя длина пакета.

#### *Вероятность потерь данных*

Вероятность потерь данных определяет долю пакетов, не дошедших до А-узла от общего числа пакетов, отправленных И-узлом. Причинами потери данных в БСС являются коллизии при доступе к узлу, потеря связности с соседними узлами, утрата энергии или доставка данных за время, превышающее допустимое, регламентированное показателем качества [74].

#### *Время жизни сети*

Время жизни БСС задает продолжительность функционирования сети – время, в течение которого БСС продолжает предоставлять сервис по доставке данных. Из-за ограниченности энергетических ресурсов сенсорных устройств их работа программируется на активный режим, при котором энергия

расходуется на выполнение функций передачи, прием или обработки данных и режим сна, при котором устройство не расходует энергию. [84].

#### *Площадь покрытия*

Площадь покрытия, как правило, выражается через достаточное число сенсоров для покрытия области с заданной площадью таким образом, чтобы создать сплошное сенсорное поле [41,81].

#### *Устойчивость к изменению топологии*

Устойчивость означает, что БСС способна продолжать выполнять свои функции при изменении топологии: перемещения узлов, смены состояния узлов, потери узлов. Благодаря устойчивости, БСС можно эксплуатировать на земле и в воздухе, разворачивать их работу в труднодоступных местах. Устойчивость количественно можно определить, как время, требуемое на обновление таблицы маршрутизации после изменений, произошедших в структуре БСС [37,92].

Таким образом, в зависимости от стратегии маршрутизации могут меняться, время доставки данных, время жизни БСС, пропускная способность БСС, остаточная энергия БСС.

### 1.3. Стандарты беспроводных сенсорных сетей

#### 1.3.1. Стандарт IEEE 802.15.4

Базовым для БСС является стандарт IEEE 802.15.4, разработанный в 2003 году. Основная цель его разработки – обеспечение дальности соединения, сравнимой с Wi-Fi, но с меньшим энергопотреблением сенсорными устройствами. Начиная с мая 2007 г. в Российской Федерации все устройства, отвечающие стандарту IEEE 802.15.4 подвергаются обязательной сертификации [99].

Стандарт IEEE 802.15.4 специфицирует два нижних уровня модели OSI: физический (PHY) и канальный (MAC).

На физическом уровне все процедуры направлены на побитовую обработку: способ передачи по каналу связи, синхронизация, линейное кодирование,

модуляция сигнала. Физический уровень специфицирует интерфейсы для связи сенсорного устройства (узла) с другими устройствами (узлами) и, соответственно, аппаратные схемы для построения сети из сенсорных узлов. Реализация физического уровня БСС на практике означает, что необходимо выбрать частоту(ы) каналов, уровень мощности передачи, сигналов управления и схему работы приемопередатчика.

На рисунке 1.8 приведена схема распределения частотных диапазонов по 27-ми зарезервированным каналам приема-передачи физического уровня стандарта IEEE 802.15.4:

- 868 МГц – канал 0 со скоростью 20 Кбит/с;
- 915 МГц – каналы 1-10 шириной 3 МГц со скоростью 40 Кбит/с;
- 2.4 ГГц – каналы 11-27 шириной 5 МГц со скоростью 250 Кбит/с.

На территории Российской Федерации к использованию доступен только частотный диапазон 2.4 ГГц с 16-ю каналами.

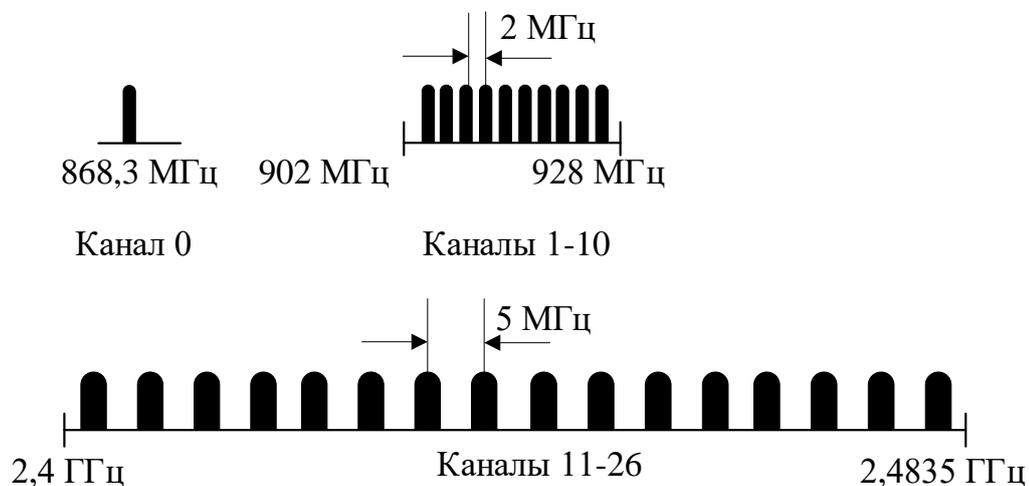


Рисунок 1.8 – Распределение частотных каналов стандарта IEEE 802.15.4

Канальный уровень отвечает за локальную связь между устройствами. Единицей измерения на канальном уровне является кадр, который содержит биты полезной информации и биты служебной информации. Кадр имеет свою строго определенную структуру. На канальном уровне происходит проверка целостности

данных, доставленных с физического уровня, и их транспортировка на сетевой уровень.

Канальный уровень включает два подуровня:

- подуровень MAC (Media Access Control), на нем реализуется управление доступом к физической среде;
- подуровень LLC (Logical Link Control), на нем реализуется управление логикой передачи данных.

В функции подуровня MAC входят процедуры регулирования множественного доступа с разделением по времени к общему ресурсу, каким в данном случае является канал приема-передачи и управления каналами связи сенсорных узлов.

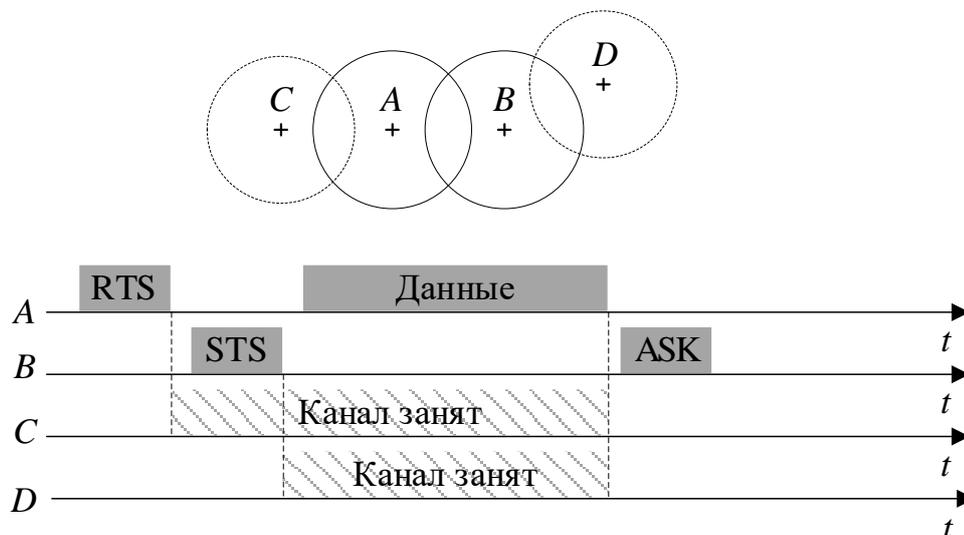
В функции подуровня LLC входят процедуры передачи кадров данных, обеспечения целостности данных и сервиса для вышележащего сетевого уровня – сетевой уровень запрашивает транспортную операцию с определенным уровнем надежности.

По стандарту IEEE 802.15.4 реализуется полудуплексный обмен данными между двумя взаимодействующими узлами. Доступ к ближайшему соседу по эфиру осуществляется методом CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance – множественный доступ с контролем несущей и предотвращением конфликтов) [93].

Узел, имеющий данные для передачи, отправляет jam signal – сигнал с битовым шаблоном, предупреждающий о занятии канала и прослушивает эфир. Если во время прослушивания узел обнаруживает jam signal другого устройства, то сигнал откатывается на случайный отрезок времени и после снова прослушивает эфир. Число попыток отправки jam signal ограничено. Если эфир свободен, то узел передает данные выбранному соседнему узлу. Согласно стандарту - доставки кадра должна быть подтверждена. Рисунок 1.9 демонстрирует последовательность взаимодействия узлов методом CSMA/CA.

Согласно стандарту, продолжительность перехода устройства из спящего состояния в активное – 10-15 мс, продолжительность идентификации

нового сенсорного узла – до 30 мс. Таким образом, время самоорганизации БСС – это период в течение которого обновляется таблица маршрутизации.



$A, B, C, D$  – сенсорные устройства; RTS – запрос на передачу данных;  
STS – разрешение на передачу данных; ASK – подтверждение приема данных.

Рисунок 1.9 – Временная диаграмма передачи данных методом CSMA/CA

Стандарт IEEE 802.15.4 определяет два вида узлов БСС:

- RFD (reduced-function device) – устройства с ограниченными функциями, выполняющие измерения в зоне размещения устройства;
- FFD (full-function device) – полнофункциональные устройства, выполняющие как измерения, так и ретрансляцию данных.

БСС по стандарту IEEE 802.15.4 могут объединять до 264 сенсорных устройств.

Стандарт IEEE 802.15.4 является фундаментом для настройки высокоуровневых протоколов с целью создания БСС под конкретные приложения. Де-факто такие протоколы стали стандартом ZigBee (по названию альянса – объединение с 2002 года сообщества компаний для стандартизации протоколов и интерфейсов умных устройств от различных производителей).

### 1.3.2. Стандарт ZigBee

В настоящее время ZigBee представлен на рынке полностью совместимыми на программно-аппаратном уровне узлами (устройствами) БСС. На основе ZigBee создаются проекты интернета вещей. Благодаря поддержке "профилей устройств", для которых процессы передачи, приема и ретрансляции данных реализуются согласно стеку протоколов ZigBee, умные устройства объединяются в сети интернета вещей. Таким образом, IEEE 802.15.4 специфицирует два нижних уровня: физический и канальный (MAC-уровень), а ZigBee специфицирует сетевой уровень и уровень приложений (рисунок 1.10) [98].



Рисунок 1.10 – Стек протоколов ZigBee

Спецификация ZigBee задает описание функций стека протоколов. Организация в виде стека означает, что протоколы верхних уровней выполняются при условии доставки сервисов протоколов нижележащих уровней. Взаимодействие между уровнями стека протоколов ZigBee реализуется через точки доступа к сервисам.

Уровень приложений (APL) позволяет создавать профили умных устройств с назначением их роли в БСС: координатор, маршрутизатор или

конечное устройство. Через профили стека ZigBee реализуется совместимость умных устройств.

В функции сетевого уровня (NWK) входит обработка сетевых адресов для выбора маршрутов согласно запросам, поступающим от MAC уровня.

В стандарте ZigBee возможно создание профилей «координатор», «маршрутизатор» и «оконечный узел».

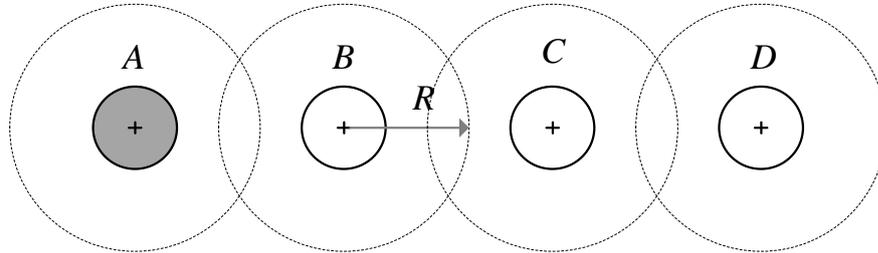
Координатор выполняет функции центра управления БСС. В функции маршрутизатора входит построение эффективных маршрутов между любыми узлами БСС согласно реализуемой стратегии маршрутизации. Оконечный узел наделен только функциями приема-передачи данных.

Стандарт ZigBee рекомендует протоколы для любой БСС. Набор протоколов для конкретной БСС выбирается ее проектировщиком в соответствии с решаемой задачей и называется профилем стека. Например, для проектирования БСС умного производства будет составлен один профиль, для управления техпроцессом – другой, для логистики – третий и т.д. Профили отличаются наборами протоколов и параметрами БСС, такими как масштаб БСС, глубина таблиц маршрутизации, поддерживаемые приложения, реализуемая политика безопасности [27].

### 1.3.3. Топологии беспроводных сенсорных сетей

Важной особенностью БСС, построенных по стандарту ZigBee является выбор топологии сети, в наибольшей степени отвечающей конкретной реализации практической задачи. Поскольку точная структура БСС, в основном, заранее не может быть определена, то установив некоторые параметры в профиле стека общая топология сети будет предложена автоматически. Например, если по условию практической реализации БСС необходимы устройства, расположенные на некоторой территории вдоль линии конвейера, то при правильной установке параметров будет создана линейную структура (рисунок 1.11).

Для других приложений БСС могут быть эффективными другие топологии, например древовидная, звездообразная, но для одноранговых сетей применяется ячеистая топология. Такие БСС называются Mesh сетями.



$A$  – координатор;  $B, C, D$  – сенсорные устройства;  $R$  – радиус действия сенсорного устройства

Рисунок 1.11 – Линейная топология

На рисунке 1.12 приведен пример Mesh сети, в структуру которой входит один узел-координатор, два узла-маршрутизатора и сенсорные узлы – окончательные устройства. В Mesh сети от любого узла источника данных (И-узел) может быть построен маршрут доставки данных до любого узла адресата (А-узел) через транзитные узлы (Т-узлы).

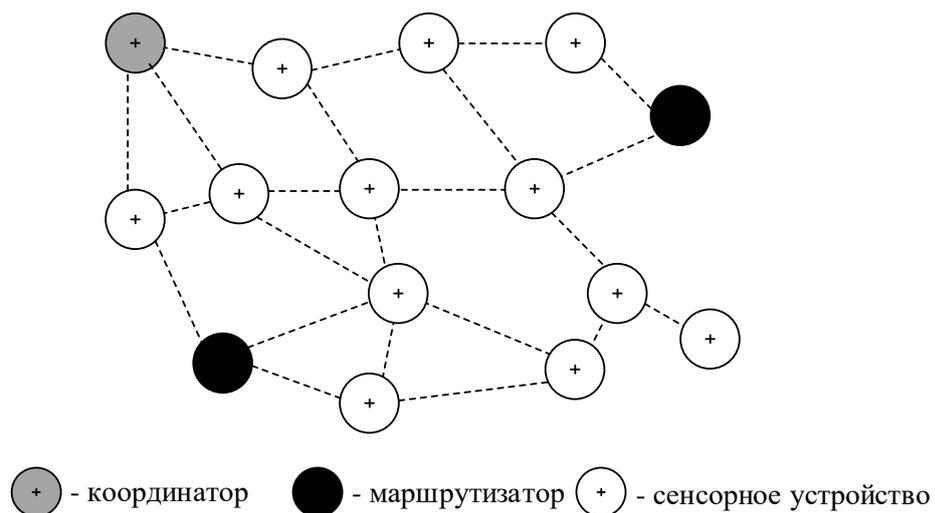


Рисунок 1.12 – БСС с ячеистой топологией

Таким образом в Mesh сети реализуется «многопрыжковая» (multi-hop) концепция построения маршрута, при которой каждый очередной узел выбирает соседний узел из допустимого множества узлов-соседей для

совершения скачка исходя из надежности канала и показателей качества соседнего узла. При недоступности какого-либо узла на предполагаемом маршруте, сеть способна построить другие маршруты, используя оставшиеся активные узлы [85].

Преимущества организации БСС по топологии mesh очевидны:

- живучесть БСС с mesh-топологией;
- масштабируемость БСС за счет промежуточных устройств, ретранслирующих данные до узла назначения;
- мертвые зоны или слабые сигналы из-за наличия препятствий легко исключаются размещением дополнительных сенсорных устройств.

#### 1.4. Методы маршрутизации в БСС

Известные методы маршрутизации в одноранговых БСС приведены на рисунке 1.13, это простая, фиксированная и адаптивная маршрутизация, представленные несколькими вариантами реализации. Основное отличие между методами заключается в том, на сколько учитываются свойства БСС при выборе маршрута – изменение топологии сети, ограничения вычислительных и энергетических ресурсов узлов БСС [68,96].

В стратегии простой маршрутизации при выборе маршрута доставки данных не учитываются такие свойства БСС как возможное изменение топологии БСС и ограничения вычислительных и энергетических ресурсов узлов. Простая маршрутизация считается малоэффективной с точки зрения обеспечения кратчайшего пути и оптимального времени доставки данных, но обеспечивает гарантированную доставку данных в условиях потери узлов БСС. На практике распространение получили методы простой случайной маршрутизации и простой лавинной маршрутизации.



Рисунок 1.13 – Методы маршрутизации в одноранговых БСС

Метод простой случайной маршрутизации основан на случайном выборе свободного канала от И-узла к одному из своих соседних узлов, далее этот соседний узел случайно выбирает свободный канал до своего соседнего узла и т.д. Пакет таким образом передается от узла к узлу и когда-то будет доставлен А-узлу с конечной вероятностью. При этом не обеспечивается оптимальная маршрутизация во всех смыслах: ни по числу хопов, ни по времени доставки данных, ни по расходу ресурсов Т-узлов. При реализации простой лавинной маршрутизации И-узел передает пакет по всем направлениям к своим соседним узлам, а от них по всем

направлениям их соседних узлов и т.д., в результате чего пакет размножается, что негативно сказывается на пропускной способности БСС. Кроме того, в А-узле и всех Т-узлах приходится уничтожать пакеты-дубликаты. Тем не менее у метода простой лавинной маршрутизации есть неоспоримое преимущество – гарантированное минимальное время доставки данных, поскольку из множества направлений отправки пакета, хотя бы одно обеспечивает минимальное время доставки. Метод рекомендуется для применения в незагруженных БСС, в которых требования по обеспечению таких показателей качества функционирования БСС, как время и надежность доставки данных регламентируются [68].

При реализации методов фиксированной маршрутизации для доставки данных будет выбран кратчайший путь с точки зрения числа хопов от И-узла к А-узлу, но без учета расхода вычислительных и энергетических ресурсов Т-узлов. Для каждой пары источник-адресат в узле-координаторе строится кратчайший путь в соответствии с актуальной таблицей маршрутизации. Таблица маршрутизации также хранится в узле-координаторе и обновляется при изменении топологии БСС, правда с задержкой, задаваемой временем опроса всех узлов. Отсутствие учета расхода вычислительных и энергетических ресурсов Т-узлов при выборе маршрута приводит к тому, что одни и те же Т-узлы будут выбраны в качестве ретрансляторов данных, что чревато возникновением коллизий при доступе к ресурсам Т-узлов, потерями данных и неоправданными задержками доставки данных. Фиксированная маршрутизация может быть реализована в одном из двух вариантов: однопутевая и многопутевая. Фиксированная однопутевая маршрутизация означает наличие единственного пути доставки данных от И-уза А-узлу. Этот вариант не обеспечивает гарантированной доставки данных, особенно в условиях загруженности БСС. Фиксированная многопутевая маршрутизация означает резервирование маршрута от И-узла к А-узлу – наличие нескольких путей доставки данных, что увеличивает вероятность гарантированной доставки данных в сравнении с однопутевой стратегией маршрутизации. Метод

фиксированной маршрутизации рекомендуется к реализации в статичных БСС и установившейся нагрузкой, например, системах типа «умный дом».

Методы адаптивной маршрутизации учитывают изменение топологии БСС и нагрузку на ее узлы. Все существующие варианты адаптивной маршрутизации различаются только показателями, учитываемыми при выборе маршрута. Известны локальная, распределенная, централизованная и гибридная маршрутизации. При реализации локальной адаптивной маршрутизации решение о выборе направления передачи принимает сам узел на основе имеющейся у него информации: таблицы маршрутизации, состояния исходящего канала (занят, свободен), длины очереди из ожидающих передачи пакетов. Таблица маршрутизации периодически обновляется, поэтому узел принимает решение руководствуясь актуальной информацией о кратчайших путях. Однако, о загруженности своих соседей узел не знает и всегда есть вероятность отправки пакета по перегруженному пути. Так называемая «близорукость» метода локальной адаптивной маршрутизации является его главным недостатком. При реализации распределенной адаптивной маршрутизации решение о выборе маршрута принимается узлом на основе информации, применяемой при локальной маршрутизации и данных, получаемых от ближайших соседей, то есть узлов, находящихся на расстоянии одного хопа. Ближайшие соседи, в свою очередь, получают данные о загруженности своих ближайших соседей и т.д. Таким образом, в каждом узле формируется дерево маршрутов, где корень дерева – сам узел, листья дерева – все возможные узлы назначения, промежуточные вершины дерева – Т-узлы маршрута. Дерево включает только маршруты с минимальным временем доставки данных. В процессе функционирования БСС узлы обмениваются друг с другом с определенной периодичностью, передавая информацию о своей загруженности. В результате получения полной информации о загруженности БСС узлы выполняют корректировку маршрутов. Такой вариант реализации адаптивной маршрутизации требует приема-передачи служебной информации, объем которой может превышать объем «полезных» данных. Кроме этого,

обмен служебной информацией осуществляется достаточно медленно, и еще какое-то время пакеты будут передаваться по не актуальным маршрутам.

При реализации централизованной адаптивной маршрутизации решение о выборе рационального маршрута от И-узла к А-узлу принимается в центральном узле, например, координаторе или маршрутизаторе. Все узлы, в свою очередь, периодически отправляют информацию о своем состоянии на центральный узел, который для них формирует и в последствие корректирует таблицу маршрутизации. Очевидно, что передача информации о загруженности узлов, формирование, корректировка, рассылка таблиц маршрутизации всем узлам БСС связано с большими временными затратами. При высокой загрузке БСС этот метод становится малоэффективным. К тому же при атаке на центральный узел, есть риск потери управления всей БСС.

Реализация гибридной адаптивной маршрутизации учитывает достоинства метода локальной и централизованной адаптивной маршрутизации: таблицы маршрутизации формируются центральным узлом и рассылается всем узлам БСС, а загруженность узла анализируется локально.

### 1.5. Постановка задачи исследования

Беспроводную сенсорную сеть представим ненаправленными графом

$$G(V, C), \quad (1.4)$$

где  $V$  – это множество узлов БСС;

$C$  – множество каналов, образуемых между соседними узлами.

Задачу диссертационного исследования сформулируем как задачу разработки моделей и алгоритмов, обеспечивающих качественный сервис по доставке данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией.

За характеристику качества предоставляемого сервиса – гарантированной доставки данных примем вероятность установления соединения от И-узла к А-узлу через Т-узлы, то есть возможность построения выделенного маршрута для дальнейшей передачи данных за допустимое время [50].

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

Значение характеристики зависит:

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

$p_1$  – 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 по (1.3) применительно к конкретному каналу. Соответственно пропускной способностью  $R$  маршрута будем считать минимум пропускной способности среди всех каналов на маршруте:

$$p_2(R) = \min \{ p_2(v_i, v_{i+1}) \}, i \in R. \quad (1.5)$$

$p_3$  – 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,  $p_1 = n$  из (1.2);

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

$h_1$  – 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),  $h_2=n_{att}$  из (1.2).

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

Таким образом, запишем функционал  $F$  модели БСС

$$Ch(t)=F(G, P(t), H(t), t). \quad (1.6)$$

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.

Выводы по первой главе

1. Приведена концептуальная модель беспроводной сенсорной сети на уровне описания узлов, свойств сети, основных характеристик оценки качества сети и алгоритмов маршрутизации.
2. Выделены показатели качества беспроводной сенсорной сети, которые оцениваются вероятностно-временными характеристиками доставки данных.
3. Выполнена постановка задачи диссертационной работы как задача разработки моделей и алгоритмов, обеспечивающих качественный сервис по доставке данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией [50].

4. Выполнено разбиение задачи диссертационного исследования на три подзадачи: оптимального размещения узлов БСС на заданной территории для обеспечения нескольких маршрутов доставки данных; выбора маршрута доставки данных из нескольких возможных по показателям, актуальным для БСС и обеспечением качества предоставляемой услуги; создания имитационной модели, как средства для выбора структуры и параметров БСС на этапе проектирования БСС. Постановка задачи оптимального размещения узлов представлена в работах [69].

## 2. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ПО КРИТЕРИЮ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМУМА ИНФОРМАЦИИ

### 2.1 Постановка задачи размещения

Для решения проблемы оптимизации расположения сенсоров в распределенной БСС используем различные целевые функции и метрики. В ходе решения проблемы рассматриваются расположение датчиков в зоне ответственности (детерминистическое или стохастическое), датчики с одинаковыми и различными зонами чувствительности, наложение дополнительных условий в виде энергетической эффективности, минимального количества сенсоров в БСС или организации сетевого трафика [21,35].

Рассмотрим задачу оптимального расположения сенсоров на заданной территории применительно к прикладной задаче экологического мониторинга (рисунок 2.1).

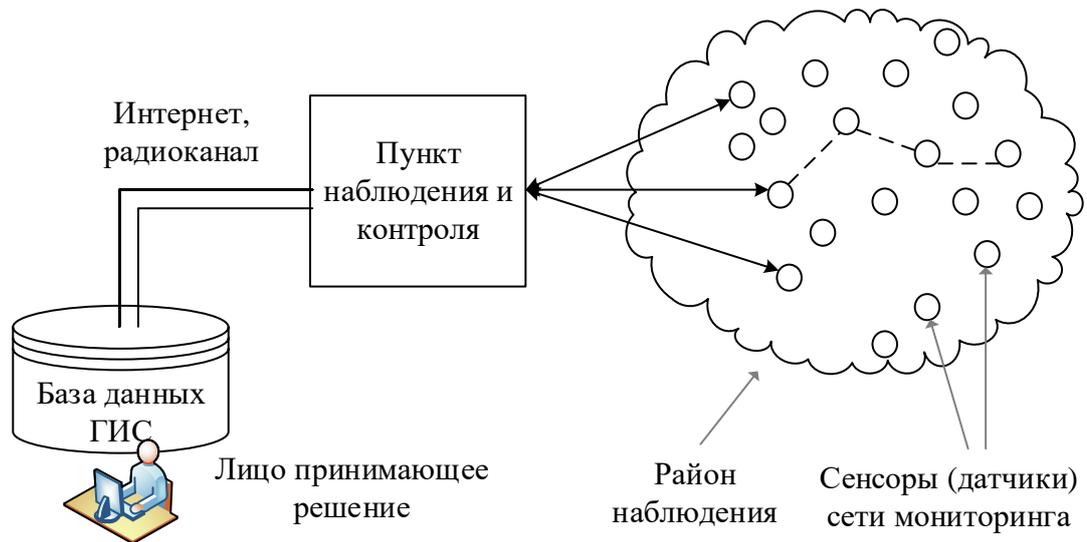


Рисунок 2.1 – Общий вид БСС мониторинга экологической обстановки

В данной работе проблема оптимизации расположения сенсоров в распределенной многосенсорной системе мониторинга включает в себя

нахождение решения следующих задач:

1. Нахождение оптимального расположения сенсоров БСС с точки зрения полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков. То есть нахождение такого расположения сенсоров, при котором каждая точка в зоне ответственности БСС находится в зоне чувствительности хотя бы одного или  $k$  сенсоров для общих случаев.

Постановка задачи оптимального расположения сенсоров представлена на рисунке 2.2. В БСС имеется  $n$  гетерогенных сенсоров и их гетерогенность выражается в том, что зоны чувствительности сенсоров различны по форме и по охватываемой площади зоны ответственности. В такой сети могут быть участки зоны ответственности, не попавшие в зону чувствительности ни одного сенсора [5].

Следует учесть, что полное покрытие зоны ответственности зонами чувствительности сенсоров гарантирует построение маршрута передачи данных, но не означает, что время доставки будет в пределах допустимого значения. Оптимальная с точки зрения времени доставки данных структура БСС должна содержать большее количество сенсоров. При разработке алгоритма оптимизации в этом случае следует учитывать ошибки определения местоположения объекта [10,11].

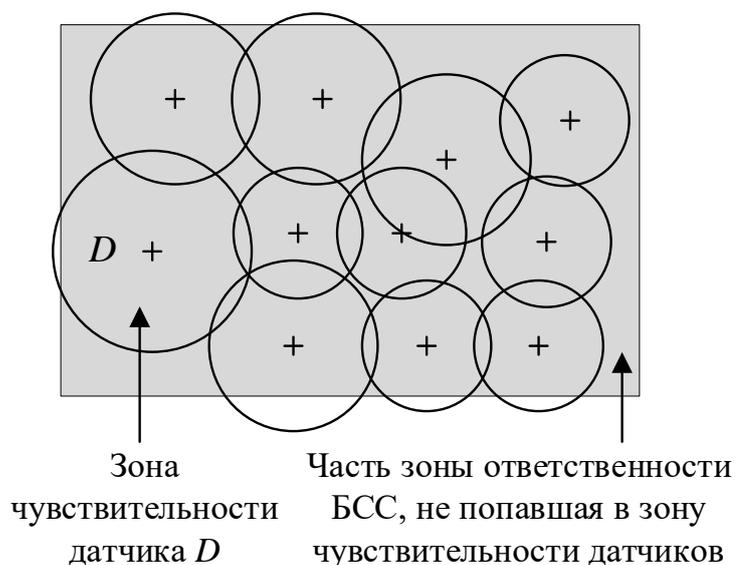


Рисунок 2.2 – Зона ответственности и зоны чувствительности датчиков БСС

2. Нахождение оптимального расположения сенсоров в сети мониторинга с точки зрения оптимизации информационных потоков в сети мониторинга [14]. Необходимо найти такого расположения сенсоров, при котором данные, поступающие на пункт наблюдения и контроля (ПНК), будут находиться в пределах заранее заданных границ допустимого искажения информационного сигнала.

Постановка задачи оптимального расположения сенсоров с точки зрения оптимизации поток в сети мониторинга представлена на рисунке 2.3. На рисунке представлены два возможных варианта организации трафика в сети мониторинга. Передача данных сенсорами  $A_1$  и  $B_1$  проходит по более короткому пути, чем у сенсоров  $A_2$  и  $B_2$ . При этом следует учесть, что сенсор  $B_2$  может использовать корреляцию между сигналами  $A_2$  и  $B_2$ , чтобы совместно кодировать свои данные с данными сенсора  $A_2$  и, следовательно, оптимизировать информационный поток в сети мониторинга, а также повысить качество характеристик обнаружения объекта. Следовательно, оптимизации структуры трафика непосредственно связана с проблемой размещения сенсоров в сети мониторинга.

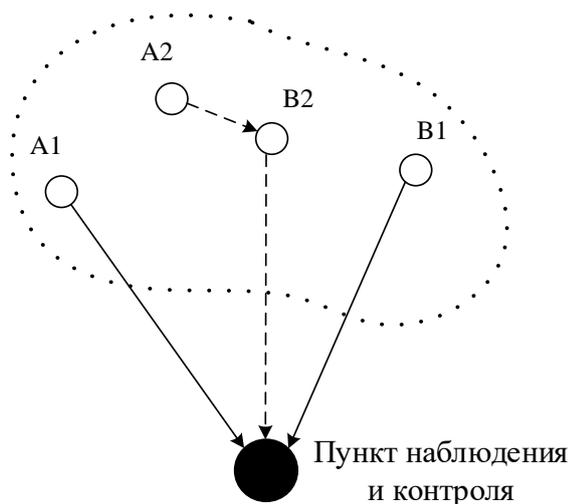


Рисунок 2.3 – Организация трафика в сети мониторинга

При разработке алгоритмов оптимизации применим инструментарий интегральной геометрии и теории вероятности.

## 2.2. Определение зоны покрытия датчиками зоны ответственности сети мониторинга

Делаем допущение: зона чувствительности каждого  $i$ -го сенсора, расположенного в точке сети мониторинга с координатами  $(x_i, y_i)$ , представляет собой круг радиусом  $r_i=1$ . Если сеть мониторинга является гомогенной, то есть состоит из одинаковых сенсоров, то  $r_1 = r_2 = \dots = r=1$ . Любая точка поверхности, принадлежащая периметру зоны чувствительности сенсора  $s_i$  не находится в зоне чувствительности сенсора  $s_j$ , если расстояние между сенсорами  $s_i$  и  $s_j$  [30]

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 2r \quad (2.1)$$

Рассмотрим рисунок 2.4

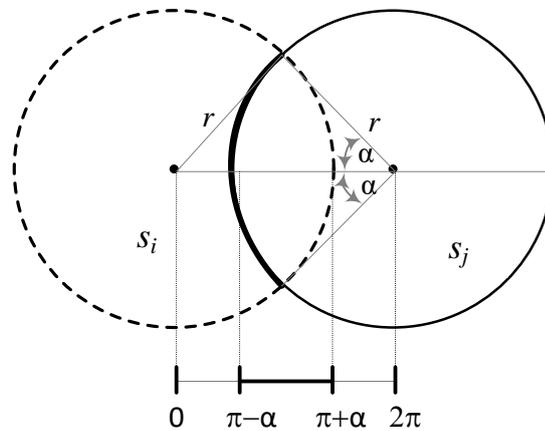


Рисунок 2.4 – Определение сегмента периметра зоны чувствительности сенсора  $s_i$ , находящегося в зоне чувствительности сенсора  $s_j$

Пусть сенсор  $s_j$  находится слева от сенсора  $s_i$  ( $y_i = y_j; x_i > x_j$ ). Определим угол  $\alpha = \arccos\left(\frac{d(s_i, s_j)}{2r}\right)$ . Дуга периметра зоны чувствительности сенсора  $s_i$ ,

опирающаяся на угол  $[\pi-\alpha, \pi+\alpha]$  попадает в зону чувствительности сенсора  $s_j$ . На основе этого утверждения определим алгоритм перекрытия зон чувствительности  $k$  одинаковых сенсоров, расположенных, как показано на рисунке 2.5, следующим образом:

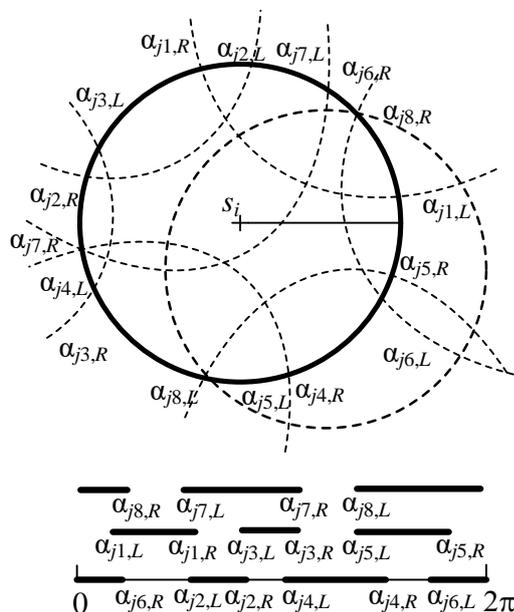


Рисунок 2.5 – Определение части периметра зоны чувствительности сенсора  $s_i$ , находящейся в зоне чувствительности соседних с ним сенсоров

– Для каждого сенсора  $s_j$ , такого, что  $d(s_i, s_j) < 2r$  определяем угол дуги  $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$  периметра сенсора  $s_i$ , который находится в зоне чувствительности сенсора  $s_j$ .

– Для всех сенсоров  $s_j$ , таких, что  $d(s_i, s_j) < 2r$ , находящихся по соседству с сенсором  $s_i$ , помещаем точки  $\alpha_{j,L}$  и  $\alpha_{j,R}$  на линию, представляющую градусы окружности в интервале от 0 до  $2\pi$  и соединяем эти точки отрезком прямой. Линии  $[0, 2\pi]$  располагаем одна под другой соответственно нисходящему порядку датчиков, так, что линии, соответствующие большему порядковому номерам датчиков, находятся вверху, а линии, соответствующие меньшим порядковым номерам датчиков, находятся под ними.

– Периметр зоны чувствительности сенсора  $s_i$  полностью

перекрывается зонами чувствительности соседних датчиков, если отрезки  $[\alpha_{j,L}, \alpha_{j,R}]$  всех датчиков могут составить непрерывную линию  $[0, 2\pi]$ .

Предположим, что зоны чувствительности сенсоров по-прежнему имеют форму круга, но радиусы зоны чувствительности не равны единице и не равны между собой.

Рассмотрим два случая:

Случай 1. Сенсоры имеют круговые зоны чувствительности с различными радиусами как показано на рисунке 2.6.

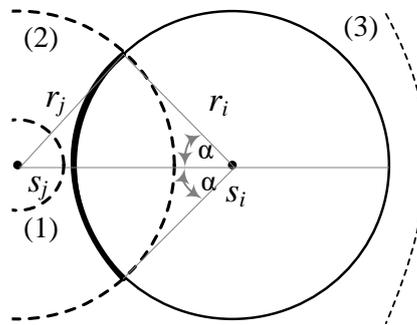


Рисунок 2.6 – Зоны чувствительности сенсоров  $s_j$  и  $s_i$  круговые зоны с различными радиусами (случай 1)

– При условии, что  $r_j < d(s_i, s_j)$  сенсор  $s_j$  лежит вне зоны чувствительности сенсора  $s_i$ .

– При условии, что  $d(s_i, s_j) - r_i \leq r_j \leq d(s_i, s_j) + r_i$  дуга периметра зоны чувствительности сенсора  $s_i$ , опирающаяся на угол  $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ , попадает на периметр зоны чувствительности сенсора  $s_j$ , а угол  $\alpha$  можно найти по формуле:

$$r_j^2 = r_i^2 + d(s_i, s_j)^2 - 2r_i d(s_i, s_j) \cos \alpha . \quad (2.2)$$

– При условии, что  $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$  весь периметр зоны чувствительности сенсора  $s_i$   $[0, 2\pi]$  входит в зону чувствительности сенсора  $s_j$ .

Случай 2. Сенсоры имеют круговые зоны чувствительности с

различными радиусами как показано на рисунке 2.7.

– При условии, что  $r_j < r_i - d(s_i, s_j)$  периметр зоны чувствительности сенсора  $s_i$  лежит вне зоны чувствительности сенсора  $s_j$ .

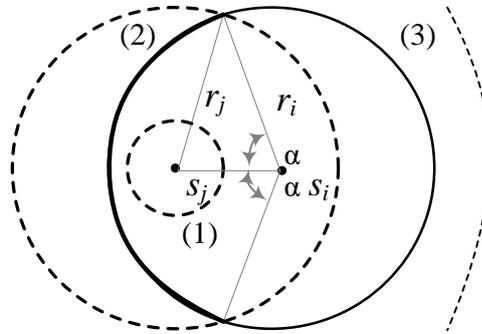


Рисунок 2.7 – Зоны чувствительности сенсоров  $s_j$  и  $s_i$  круговые зоны чувствительности с различными радиусами (случай 2)

– При условии, что  $r_j - d(s_i, s_j) \leq r_j \leq d(s_i, s_j) + r_i$  дуга периметра зоны чувствительности сенсора  $s_i$ , опирающаяся на угол  $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$ , попадает на периметр зоны чувствительности сенсора  $s_j$ , а угол  $\alpha$  можно найти из (2.2).

– При условии, что  $r_j > d(s_i, s_j) + r_i$  весь периметр зоны чувствительности сенсора  $s_i$   $[0, 2\pi]$  входит в зону чувствительности сенсора  $s_j$ .

Для определения частей зоны ответственности сети мониторинга, не попавших в зону чувствительности датчиков, пункт наблюдения и контроля посылает всем датчикам широковещательное сообщение о требуемом количестве датчиков  $k$ , покрывающих периметр зоны чувствительности каждого датчика. Затем каждый датчик выходит на связь с соседними датчиками и по вышеописанному алгоритму определяет часть периметра своей зоны чувствительности, не попавшую в зону чувствительности  $k$  соседних датчиков. Эта информация передается на пункт наблюдения и контроля, который определяет местоположение частей зоны ответственности сети мониторинга, не попавших в зону покрытия датчиков.

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.

### 2.3 Минимизации зоны нечувствительности сети мониторинга

Сделаем допущение о том, что в зоне ответственности сети мониторинга не осталось таких участков, которые не находились бы в зоне чувствительности как минимум  $k$  датчиков. Целью развертывания сети мониторинга является как обнаружение, так и определение местоположения объекта наблюдения. С учетом этого определим область в зоне ответственности сети мониторинга, в которой ошибка определения местоположения объекта наблюдения превышает заданную границу как зону нечувствительности [36,48].

Определим разрешение сети мониторинга как минимальное расстояние  $l$ , такое, что сеть мониторинга может различить две точки на плоскости, если расстояние между ними больше, чем  $l$ .

В работе [52] было доказано, что если ошибка определения местоположения объекта наблюдения имеет верхнюю границу, равную  $\varepsilon$ , то разрешение сети мониторинга

$$l \leq \sqrt{3}\varepsilon. \quad (2.3)$$

Если ошибка определения местоположения объекта наблюдения имеет нижнюю границу, равную  $\varepsilon$ , то

$$l \geq 2\varepsilon. \quad (2.4)$$

Рассмотрим рисунок 2.8.

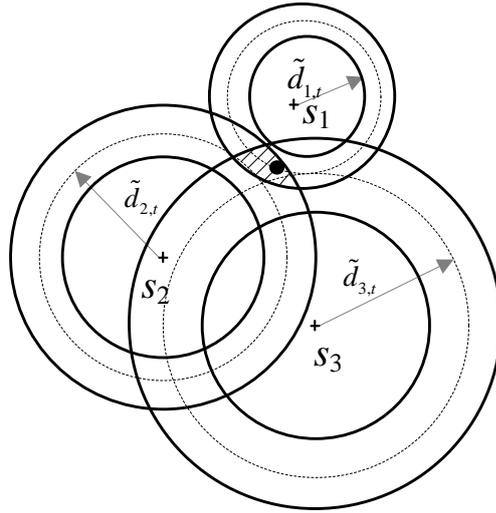


Рисунок 2.8 – Определение местоположения объекта  $t$  с помощью сенсоров  $s_1, s_2, s_3$

Оценка определения сенсором  $s_i$  евклидова расстояния до объекта  $\tilde{d}_{i,t}$  удовлетворяет неравенству:

$$d_{i,t} - e \leq \tilde{d}_{i,t} \leq d_{i,t} + e, \quad (2.5)$$

где  $e$  – ошибка определения местоположения объекта.

То тогда истинное расстояние до объекта равно  $\tilde{d}_{i,t} - e \leq d_{i,t} \leq \tilde{d}_{i,t} + e$ . Если сенсор  $s_i$  не может отличить точку  $t$  на плоскости от точки  $t'$ , то тогда истинное расстояние до точки  $t'$  будет также лежать в пределах оценки сенсора  $[\tilde{d}_{i,t} - e; \tilde{d}_{i,t} + e]$ . Тогда разность расстояний  $d_{i,t}$  и  $d_{i,t'}$  удовлетворяет неравенству:

$$-2e \leq d_{i,t} - d_{i,t'} \leq 2e. \quad (2.6)$$

Неравенство (2.6) означает, что если имеется сенсор  $S_i$ , расстояние от которого до точек  $t$  и  $t'$  различается больше, чем на  $2e$ , то такой сенсор может отличить точку плоскости  $t$  от точки  $t'$ . В противном случае, точки  $t$  и  $t'$  не будут различаться сенсорами сети мониторинга при условии, что расстояние между ними равно  $4e$ .

Рассмотрим рисунок 2.9.

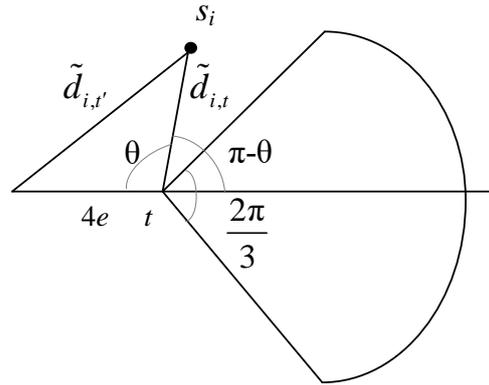


Рисунок 2.9 – Точки  $t$  и  $t'$  находятся в зоне чувствительности сенсора  $s_i$ , но он не может их различить

Из неравенства (2.6) имеем:

$$d_{i,t'} \leq d_{i,t} + 2e, \quad (2.7)$$

$$\cos \theta = \frac{d_{i,t}^2 + (4e)^2 - d_{i,t'}^2}{2d_{i,t}4e} \geq \frac{d_{i,t}^2 + 16e^2 - (d_{i,t} + 2e)^2}{8ed_{i,t}} \geq \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}}. \quad (2.8)$$

При  $d_{i,t} \rightarrow \infty$  выражение (2.8) представляет собой неопределенность вида  $\frac{\infty}{\infty}$ ,

поэтому для нахождения  $\lim_{d_{i,t} \rightarrow \infty} \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}}$  воспользуемся правилом Лопиталю:

$$\lim_{d_{i,t} \rightarrow \infty} \frac{12e^2 - 4ed_{i,t}}{8ed_{i,t}} = \frac{(12e^2 - 4ed_{i,t})'}{(8ed_{i,t})'} = -\frac{4e}{8e} = -\frac{1}{2}. \quad (2.9)$$

Поэтому  $\cos \theta \geq -\frac{1}{2}$ , нижний предел значения угла  $\theta = \arccos\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{2\pi}{3}$  и,

следовательно, в случайно выбранном секторе с радиусом  $r$  и углом  $\varphi = \frac{2\pi}{3}$

должен существовать хотя бы один сенсор, чтобы разрешение сети

мониторинга  $l \leq 4e$ . Исходя из выражения (2.1), можно заключить, что если существует хотя бы один сенсор в случайно выбранном секторе зоны ответственности сети мониторинга с центром в точке  $t$ , радиусом  $r$  и углом  $\varphi = \frac{2\pi}{3}$ , то ошибка определения местоположения объекта наблюдения с помощью сети мониторинга ограничена сверху величиной

$$\varepsilon = \frac{4\sqrt{3}e}{3}. \quad (2.10)$$

Из рисунка 2.10 видно, что в любой сектор  $\left(r, \frac{2\pi}{3}\right)$  можно вписать окружность радиуса  $\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}+2}r \approx 0,464r$ .

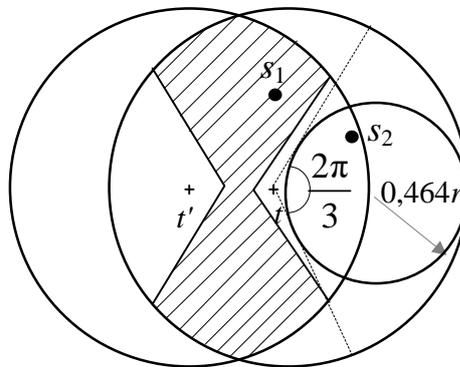


Рисунок 2.10 – Различение двух точек на плоскости

Как видно из рисунка 2.10, сенсор  $s_1$  не может различить точки  $t$  и  $t'$ , тогда как сенсор  $s_2$  различает данные точки.

Величина ошибки определения местоположения объекта (2.10) будет гарантирована при условии, что радиальная зона ответственности сети мониторинга, имеющая радиус  $r$ , полностью покрыта зонами чувствительности сенсоров, имеющими радиус  $r_{\text{чувст}} = 0,464r$ .

Утверждение останется справедливым и для сенсоров с зоной

ответственности сети мониторинга, представляющей собой квадрат, стороны которого кратны  $0,464$ . Отсюда следует, что количество сенсоров с зонами чувствительности  $r_{\text{чувст}}=0,464r$ , требуемых для покрытия квадратной зоны ответственности будет равно количеству сенсоров необходимых для покрытия круглой зоны ответственности радиуса  $r$ . Следует отметить, что поскольку данное количество датчиков покрывает только площадь зоны ответственности  $A$ , равную  $0,464^2A$ , то количество сенсоров в сети мониторинга для решения задач определения местоположения объекта должно быть в  $\frac{1}{0,464^2} \approx 4,64$  раза больше, чем для решении задач обнаружения объекта.

Для величины разрешения сети мониторинга при круговой зоне чувствительности сенсора  $2e \leq l \leq 4e$  можно записать:

$$\cos \theta = \frac{d_{i,t}^2 + (\alpha e)^2 - d_{i,t'}^2}{2d_{i,t}\alpha e} \geq \frac{(\alpha e)^2 - 4d_{i,t}e - 4e^2}{2\alpha d_{i,t}e} \geq -\frac{2}{\alpha}. \quad (2.11)$$

где  $2 \leq \alpha \leq 4$ .

Если отношение  $\frac{d_{i,t}}{e}$  велико, то  $\theta_{\max} = \arccos\left(-\frac{2}{\alpha}\right)$  и так как  $2 \leq \alpha \leq 4$ , то  $\frac{2\pi}{3} \leq \theta_{\max} \leq \pi$  и в этом случае сенсор должен присутствовать в любом секторе зоны ответственности сети мониторинга с центром в точке  $t$ , радиусом  $r$  и углом  $\phi = 2(\pi - \theta)$ . Максимальный радиус окружности, которая может быть при этом вписана в сектор  $(r, \phi)$  равен  $r_{\text{чувст}1} = \frac{\sin \theta}{1 + \sin \theta}$ . Плотность сети мониторинга равна:

$$N = \frac{n_l}{n_d}. \quad (2.12)$$

где  $n_i$  – количество датчиков в сети мониторинга, необходимое для

определения местоположения объекта;

$n_d$  – количество датчиков в сети мониторинга, необходимое для обнаружения объекта.

Относительное разрешение сети мониторинга равно:

$$\alpha = \frac{l}{e}. \quad (2.13)$$

Зависимость  $N(\alpha)$  приведена на рисунке 2.11.

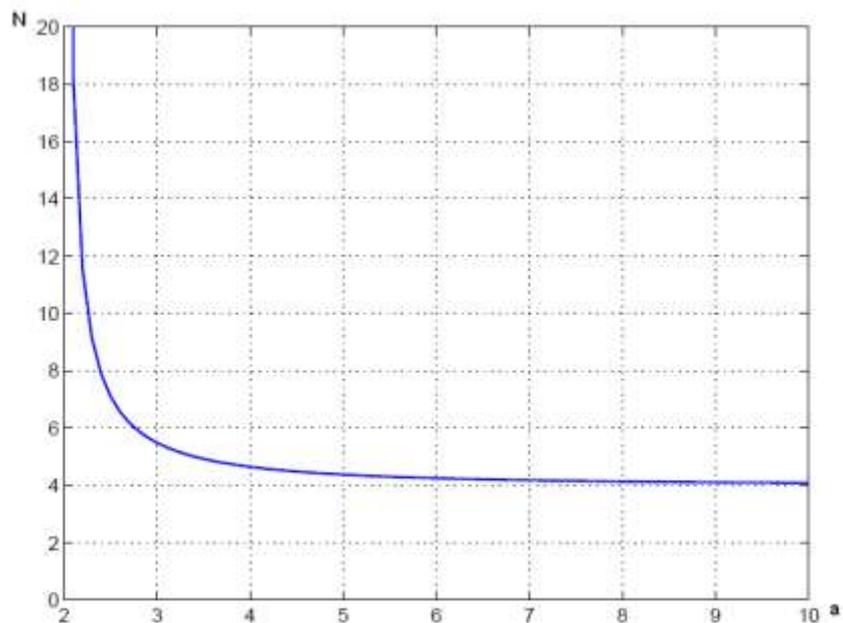


Рисунок 2.11 – Зависимость плотности сети мониторинга  $N$  от относительного разрешения

Из этой зависимости можно видеть, что если требования к разрешению сети близки значению  $2e$ , то плотность сети растет очень быстро. А при разрешении сети мониторинга  $l \geq 4e$  плотность сети мониторинга остается примерно постоянной, при этом количество датчиков в сети мониторинга, требуемое для определения местоположения объекта, примерно в четыре раза превышает количество датчиков, необходимых для обнаружения объекта. Радиус зоны чувствительности сенсора при увеличении значения  $\alpha$  имеет верхнюю границу равную  $r_B = 0,5r$ . Это означает, что при определении местоположения объекта

нужно иметь в зоне ответственности сети мониторинга радиуса  $r$  по крайней мере один сенсор с зоной чувствительности, равной  $r_{\text{чувст}} = 0,5r$ , что согласуется с триангуляционным методом определения местоположения объекта. Из рисунка 2.10 видно, что компромиссным решением между величиной разрешения сети мониторинга и плотностью сети является величина  $3 \leq \alpha \leq 4$ .

#### 2.4. Вероятностная модель покрытия зоны ответственности системы мониторинга зонами чувствительности сенсоров

При разработке вероятностной модели считаем:

- Расположение сенсоров в зоне ответственности случайно;
- Зоны чувствительности сенсоров имеют произвольную форму;
- Зоны чувствительности сенсоров покрывают произвольную площадь зоны ответственности.

Параметры зоны ответственности:

- Системы мониторинга  $A_0$ :  $F_0$  – площадь и  $L_0$  – периметр
- Зоны чувствительности сенсора  $A_1$ :  $F_1$  – площадь и  $L_1$  – периметр.

Из рисунка 2.12 видим, что  $A_0 \cap A_1 \neq \emptyset$ . Найдем вероятность попадания в зону чувствительности сенсора  $A_1$  случайно выбранной точки в зоне ответственности  $P \in A_0$ :

$$p(P \in A_1) = \frac{2\pi F_1}{2\pi(F_0 + F_1) + L_0 L_1}. \quad (2.14)$$

Проинтегрировав по всей поверхности  $A_0$  выражения (2.14) можем вычислить размер площади  $F_{01}$  зоны чувствительности сенсора, попадающей в зону ответственности сети мониторинга  $A_{01}$ . Вычислим часть зоны ответственности, попадающую в зону чувствительности сенсора проведя нормирование величины  $F_{01}$  величиной  $F_0$ :

$$fr(A_0) = \frac{F_{01}}{F_0} = \frac{2\pi F_0 F_1}{2\pi(F_0 + F_1) + L_0 L_1} \frac{1}{F_0} = \frac{2\pi F_1}{2\pi(F_0 + F_1) + L_0 L_1} = p(P \in A_1). \quad (2.15)$$

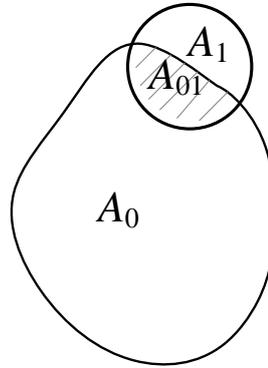


Рисунок 2.12 – Пересечение зон ответственности системы мониторинга и чувствительности сенсора

Для решения задачи возьмем систему, состоящую из  $i = \overline{1, N}$  сенсоров имеющими зоны чувствительности  $A_i$ , площади  $F_i$  и периметры  $L_i$ . Распределение сенсоров по зоне ответственности  $A_0$  является случайным. Вычислим вероятность того, что случайно выбранная точка зоны ответственности  $P \in A_0$  не попадает в зону чувствительности  $i$ -го сенсора равна:

$$p(P \notin A_i) = 1 - p(P \in A_i) = 1 - \frac{2\pi F_i}{2\pi(F_0 + F_i) + L_0 L_i} = \frac{2\pi F_0 + L_0 L_i}{2\pi(F_0 + F_i) + L_0 L_i}. \quad (2.16)$$

Пусть  $T$  – матрица размером  $k \times \binom{N}{k}$ , где каждая  $j$ -я строка является определенным сочетанием из  $N$  сенсоров по  $k$ . Тогда  $G$  – матрица размером  $(n - k + 1) \times \binom{N}{k}$ , в которой каждая  $j$ -я строка содержит элементы вектора  $[1 \dots N]$ , которые не вошли в  $j$ -ю строку матрицы  $T$ .

Рассмотрим в качестве примера вероятность попадания в зону

чувствительности сенсора  $p(T(1))$ , тогда когда точка  $P \in A_0$  попадает в зону чувствительности датчиков с первого по  $k$ -й:

$$\begin{aligned}
 p(T(1)) &= p(P \in A_1, \dots, P \notin A_{k+1}, \dots, P \notin A_N) = p(P \in A_1) \cdot \dots \cdot (P \in A_k) \cdot p(P \notin A_{k+1}) \cdot \dots \cdot p(P \notin A_N) = \\
 &= \frac{2\pi F_1}{2\pi(F_0 + F_1) + L_0 L_1} \cdot \dots \cdot \frac{2\pi F_k}{2\pi(F_0 + F_k) + L_0 L_k} \cdot \dots \cdot \frac{2\pi F_0 + L_0 L_{k+1}}{2\pi(F_0 + F_{k+1}) + L_0 L_{k+1}} \cdot \dots \cdot \frac{2\pi F_0 + L_0 L_N}{2\pi(F_0 + F_N) + L_0 L_N} = \\
 &= \frac{\prod_{j=1}^k (2\pi F_j) \prod_{z=k+1}^N (2\pi F_0 + L_0 L_z)}{\prod_{r=1}^N (2\pi(F_0 + F_r) + L_0 L_r)} = \frac{\prod_{j=1}^k (2\pi F_{T_{1,j}}) \prod_{z=1}^{N-k} (2\pi F_0 + L_0 L_{G_{1,z}})}{\prod_{r=1}^N (2\pi(F_0 + F_r) + L_0 L_r)}. \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

Вероятность того, что точка  $P \in A_0$  находится в зоне чувствительности  $k$ -го сенсора можно найти как сумму  $p(T(i))$  по всем возможным сочетаниям  $\binom{N}{k}$

$$p(S = k) = \sum_{i=1}^{\binom{N}{k}} p(T(i)) = \sum_{i=1}^{\binom{N}{k}} \left( \frac{\prod_{j=1}^k (2\pi F_{T_{i,j}}) \prod_{z=1}^{N-k} J(i, z)}{\prod_{r=1}^N (2\pi(F_0 + F_r) + L_0 L_r)} \right), \quad (2.18)$$

где  $J(i, j) = (2\pi F_0 + L_0 L_{G_{i,z}})$ .

Определим часть зоны ответственности системы мониторинга, не входящую в зону чувствительности ни одного из  $N$  сенсоров системы мониторинга, случайно распределенных по поверхности зоны ответственности, как:

$$p(S = 0) = p(P \notin A_1, \dots, P \notin A_N) = \prod_{i=1}^N p(P \notin A_i) = \prod_{i=1}^N \frac{2\pi F_0 + L_0 L_i}{2\pi(F_0 + F_i) + L_0 L_i}. \quad (2.19)$$

В случае гомогенности сенсоров, то есть  $F_i = F$  и  $L_i = L$ , следует, что вероятность попадания в зону чувствительности  $k$  датчиков случайно выбранной точки  $P \in A_0$  можно записать как:

$$p(S = k) = \frac{\binom{N}{k} (2\pi F)^k (2\pi F_0 + L_0 L)^{N-k}}{(2\pi(F_0 + F) + L_0 L)^N}. \quad (2.20)$$

Если сенсоры являются гетерогенными, то есть, когда они имеют разные площади и периметры зон чувствительности, то вычислительные затраты в соответствии с выражением (2.18) будут возрастать экспоненциально с ростом количества сенсоров в сети мониторинга. В этом случае выражение (2.18) может быть аппроксимировано с использованием математического ожидания величин  $F$  и  $L$ . В таком случае вычисление части зоны ответственности, попадающей в зону чувствительности  $k$  датчиков сети мониторинга:

$$fr(A_0) = p(S = k) = \frac{\binom{N}{k} (2\pi E(F))^k (2\pi F_0 + L_0 E(L))^{N-k}}{(2\pi(F_0 + E(F)) + L_0 E(L))^N}. \quad (2.21)$$

Необходимое количество сенсоров в сети мониторинга может быть вычислено с помощью выражений (2.17), (2.20), (2.21), при заданном значении вероятности покрытия зоны ответственности зонами чувствительности сенсоров.

Исходя из этого, при заданном количестве сенсоров в сети мониторинга можно вычислить часть зоны ответственности, которая попадет в зону чувствительности сети мониторинга – иначе говоря, вычислить вероятность покрытия зоны ответственности зонами чувствительности сенсоров.

2.5. Алгоритм совместной оптимизации расположения сенсоров и информационных потоков в сети мониторинга при допустимых границах искажения сигнала

Применим комплексный подход к решению проблемы оптимизации расположения сенсоров 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 на пункт наблюдения и контроля, лежали в пределах заданного допустимого изменения сигнала с учетом условия минимизации энергетических затрат на осуществление сеанса связи [38]. Для решения данной проблемы разобьем поверхность мониторинга  $A$  на ячейки Вороного: имеем множество ячеек  $P$  таких, что точка  $q$  будет принадлежать ячейке и относиться к  $p_i$  из  $P$ , при условии, что расстояние от  $q$  до  $p_i$  будет меньше, чем расстояние от  $q$  до любой другой точки  $P$ ), рисунок 2.13. 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.

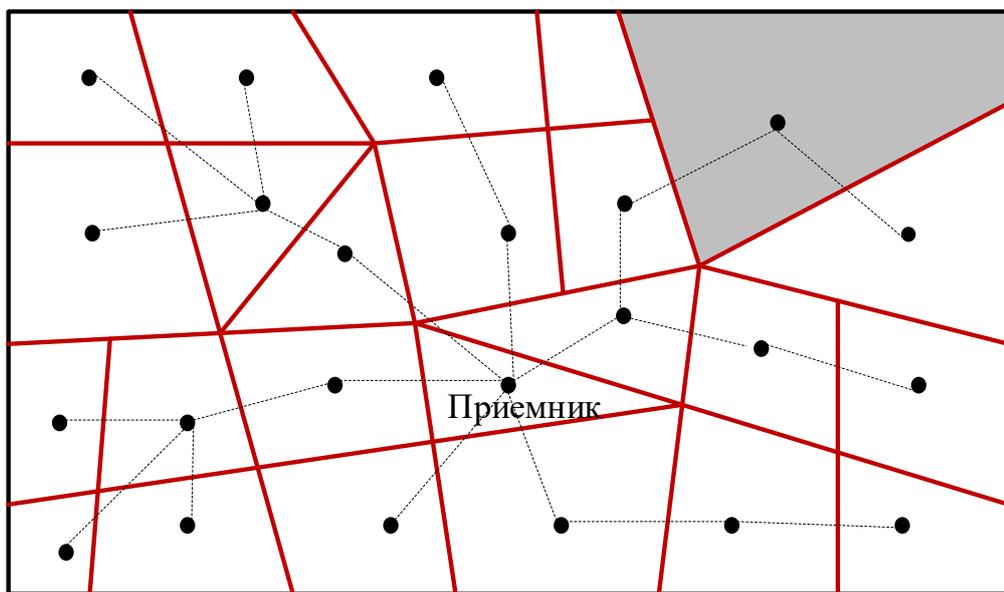


Рисунок 2.13 – Схема сбора пространственно-распределенных данных в сети мониторинга

Представим допустимые искажения сигнала в сети мониторинга двумя переменными:

- $D_{\max}$  – максимально допустимое искажение сигнала в любой точке;

–  $D_{\text{ср}}$  – среднее искажение сигнала, приходящееся на одну ячейку Вороного.

Возьмем Гауссовское случайное поле в качестве модели сигнала [43]. Выборки сигнала для каждого сенсора несут в себе информацию о гауссовской непрерывной стационарной величине  $X(u, v)$ , где  $u, v$  – географические координаты точки в зоне ответственности системы мониторинга  $A$ .

Исходя из предположения, что математическое ожидание величины  $X(u, v)$  равно нулю  $\mu_x = E[X(u, v)] = 0$ , получим функцию корреляции между величиной  $X(u_i, v_i)$ , измеряемой на узле  $i$  и величиной  $X(u_j, v_j)$ , измеренной на узле  $j$ :

$$K_X(u_j - u_i; v_j - v_i) = K_X(\tau_x; \tau_y) = e^{-a\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}} = e^{-ad_{ij}} \quad (3.21)$$

где  $d_{ij}$  – евклидово расстояние между узлами  $i$  и  $j$ ,

$a$  – корреляционная константа.

Возьмем радиальную изотропно уменьшающуюся модель корреляции для оценки максимальных искажений. В этом случае точки максимального искажения сигнала будут находиться на границе ячеек Вороного, а максимально удаленные точки каждой ячейки будут представлять собой углы этой ячейки, рисунок 2.14. Отсюда следует, что максимальное искажение сигнала каждого сенсора будет зависеть от расстояния между углами ячейки Вороного до ее центра. Поэтому при восстановлении сигнала заданное максимально допустимое искажение, полученное для каждой точки  $(u, v)$  поверхности  $A$  на декодере, который расположен в пункте наблюдения и контроля, будет равно значению среднеквадратической ошибки (СКО):

$$D(u, v) = \text{СКО}(u, v) = E[(\hat{X}(u_i, v_i) - X(u, v))^2] \leq D_{\text{max}}. \quad (2.22)$$

где  $\hat{X}(u_i, v_i)$  – квантованное измерение величины  $X(u, v)$  на сенсоре,

ближайшем к точке  $(u, v)$  поверхности  $A$ ;

$E$  – знак усреднения.

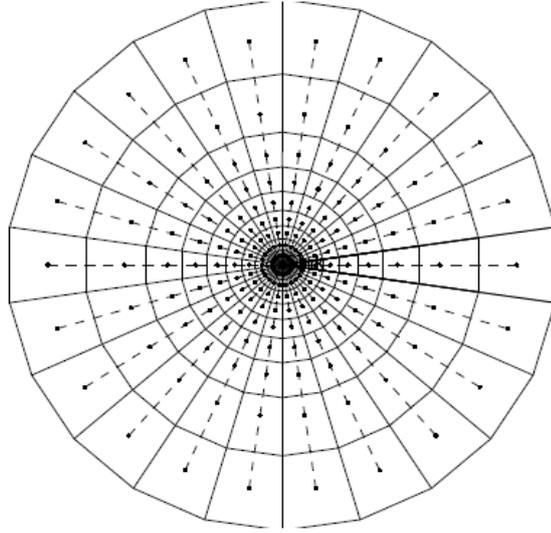


Рисунок 2.14 – Ячейки Вороного, сплошные линии, и структура трафика, пунктир, для радиального расположения сенсоров при сборе данных в ПНК, расположенном в центре области  $A$ , имеющей вид окружности

Исходя из принятой корреляционной моделью, получим величину искажения между двумя не квантованными сигналами:

$$\begin{aligned} \text{СКО}(u, v) &= E[(\hat{X}(u, v) - X(u, v))^2] = E[(\hat{X}(u_i, v_i) - X(u, v))^2] = \\ &= E\left[\left(X(u_i, v_i) + n_Q(u_i, v_i)\right)^2\right] + E[X(u, v)^2] - 2E\left[\left(X(u_i, v_i) + n_Q(u_i, v_i)\right)X(u, v)\right], \quad (2.23) \end{aligned}$$

где  $n_Q(u_i, v_i)$  – шум квантования.

Можно пренебречь шумом квантования при условии, что операция квантования выполняется с достаточным числом бит, приходящимся на выборку сигнала. Отсюда следует, что величина среднеквадратической ошибки между сигналами, полученными из двух точек области  $A$  является нелинейной функцией, зависящей от расстояния между любой точкой области, имеющей координаты  $(u, v)$  и ближайшим сенсором:

$$\begin{aligned} \text{СКО}(u, v) &= E[X(u_i, v_i)^2] + E[X(u, v)^2] - 2E[X(u_i, v_i)X(u, v)] = \\ &= \sigma^2 + \sigma^2 - 2\sigma^2 \exp(-ad_{ij}) = 2\sigma^2(1 - \exp(-ad_{ij})) \leq D_{\max} \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия сигнала.

Максимально допустимое расстояние между сенсорами для используемой радиальной модели будет равно:

$$R_{\max} = -\frac{1}{a} \log\left(1 - \frac{D_{\max}}{2\sigma^2}\right). \quad (2.25)$$

При восстановлении данных на декодере пункта наблюдения и контроля получим среднее значение искажения сигнала через интегрирование значений  $\text{СКО}(u, v)$  в области  $A$ :

$$D_{\text{cp}}(A) = \text{СКО}(A) = \frac{1}{A} \int_A \text{СКО}(u, v) dudv \leq D_{\text{cp}}, \quad (2.26)$$

где  $\text{СКО}(u, v)$  вычисляется по формуле (2.24).

В результате оптимизации находим такое расположения сенсоров и пути информационного потока в сети мониторинга, при которых в условиях, налагаемых выражениями (2.24) и (2.26) минимизируется целевая функция:

$$\sum_{i=1}^N KD(i) \times Cm(i) \rightarrow \min, \quad (2.27)$$

где  $KD(i)$  – объем данных, передаваемых сенсором  $i$ ;

$Cm(i)$  – стоимость передачи бита от сенсора  $i$  до следующего по маршруту приемника в сети мониторинга в рамках связующего дерева.

Рассмотрим организацию трафика в сети мониторинга.

На рисунке 2.3. изображены два возможных варианта структуры и трафика в сети мониторинга, которые удовлетворяют заданным пределам допустимых искажений сигнала. Передача данных сенсорами  $A_1$  и  $B_1$  проходит по более короткому пути, чем у сенсоров  $A_2$  и  $B_2$ . При этом следует учесть, что сенсор  $B_2$  может использовать корреляцию между сигналами  $A_2$  и  $B_2$ , чтобы

совместно кодировать свои данные с данными сенсора  $A_2$  и, следовательно, оптимизировать информационный поток в сети мониторинга. Следовательно, осуществлять выбор размещения сенсоров в сети мониторинга только по принципу эффективного использования энергии не является оптимальным, поскольку проблема размещения сенсоров в сети мониторинга непосредственно связана с оптимизации структуры трафика [65,83].

Рассмотрим частный случай одномерного размещения сенсоров в сети мониторинга, когда все сенсоры расположены на линии длиной  $L$ , а пункт наблюдения и контроля (ПНК) расположен в начале линии, как показано на рисунке 2.15. В общем случае, когда пункт наблюдения и контроля размещается между сенсорами, а не в начале линии, задача оптимизации расположения датчиков в сети мониторинга решается разбиением на две подзадачи - по одной для каждого подмножества сенсоров расположенного слева и справа от пункта наблюдения и контроля. Считаем, что сенсор размещен на самом близком расстоянии от пункта наблюдения и контроля, а сенсор  $N$  – на самом дальнем расстоянии. Пусть  $r_i$  - расстояние между сенсорами  $i$  и  $(i-1)$ .

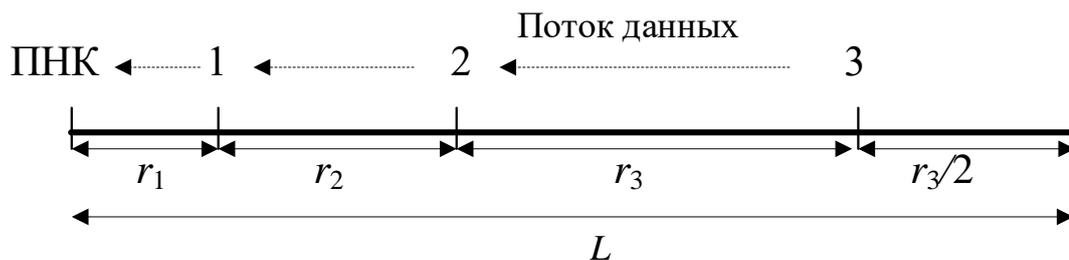


Рисунок 2.15 – Случай одномерного расположения сенсоров

Для одномерного случая расположения сенсоров границы ячеек Вороного – это средние точки между соседними парами сенсоров, рисунок 2.16.

В этом случае условие покрытия ячейками Вороного всего пространства будет иметь следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N r_i + \frac{r_N}{2} = L. \quad (2.28)$$

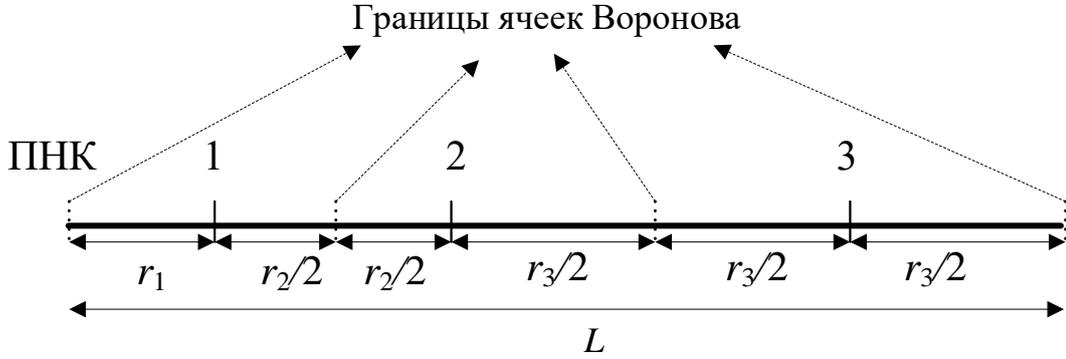


Рисунок 2.16 – Ячейки Вороного и расстояния максимального искажения при расположении сенсоров на одной линии

Исходя из выражения (2.24) получаем, что условие максимальной величины пространственных искажений сигнала будет ограничивать максимальное расстояние от любого сенсора до границы ближайшей соседней ячейки Вороного:

$$r_1 \leq R_{\max}; \quad \frac{r_i}{2} \leq R_{\max}; \quad \forall 2 \leq i \leq N. \quad (2.29)$$

Величину среднеквадратической ошибки получим через интегрирование, аналогично выражению (2.26):

$$\begin{aligned} \text{СКО}(L) &= \frac{1}{L} \int_{L_L} \text{СКО}(u) du = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \int_{V_i} E[(\hat{X}(u) - X(u))] du = \frac{1}{L} \left[ \int_0^{r_1} 2\sigma^2(1 - e^{-ad}) + 2 \sum_{i=2}^N \int_0^{\frac{r_i}{2}} 2\sigma^2(1 - e^{-ad}) + \right. \\ &\left. + \int_0^{\frac{r_N}{2}} 2\sigma^2(1 - e^{-ad}) \right] = 2 - \frac{2}{La} \left( 2N - e^{-ar_1} - 2 \sum_{i=2}^N e^{-ar_i/2} - e^{-ar_N/2} \right), \quad (2.30) \end{aligned}$$

где  $V_i$  –  $i$ -я ячейка Вороного.

Рассматриваемая задача по организации информационного трафика по кратчайшему пути до пункта наблюдения и контроля будет являться оптимальной с точки зрения минимизации общей затрачиваемой энергии для сеанса связи. Это связано с тем, что энергия, затрачиваемая на передачу данных по пути длиной  $d$  будет пропорциональна пути, возведенному в степень, равную затуханию на этом пути [33]:

$$E \propto d^k. \quad (3.31)$$

Следует учесть, что при передаче данных сенсором  $i$  сенсоры  $j$ , при  $j > i$ , для направления трафика к пункту наблюдения и контроля, маршрут потока данных неизбежно должен пролегать от сенсора  $j$  к сенсоры  $i$ .

Сделаем предположение, что на для кодирования сигнала, каждом отрезке маршрута трафика от сенсора к сенсоры, используется взаимная энтропия. Взаимная энтропия - монотонно возрастающая функция количества источников информации, следовательно, если сенсор  $i$  передает данные на сенсор  $j$ , при  $j > i$ , то поток данных на сенсоры  $j$  будет возрастать по сравнению с количеством данных в том случае, когда сенсор  $i$  не передает данные на сенсор  $j$ , и требует для передачи большего количества энергии [87].

Дифференциальная энтропия  $k$ -мерного нормального распределения  $N_k(\mu_x, K_x)$  равна

$$h(N_k(\mu_x, K_x)) = \frac{1}{2} \log(2\pi e)^k \det(K). \quad (2.32)$$

Преобразуем сигнал к дискретному виду через квантование по равномерному закону с шагом  $\Delta \rightarrow 0$  с пренебрежимо малым шумом квантования, которым можем пренебречь, и находим дискретное значение взаимной энтропии, связанное с выборками сигнала по формуле:

$$H(N_k(\mu_x, K_x)) \approx h(N_k(\mu_x, K_x)) - k \log \Delta. \quad (2.33)$$

Пусть переменная  $T_i$  - набор сенсоров, через который проходит маршрут потока данных к пункту наблюдения и контроля для каждого узла  $i$ ., следовательно, общее количество бит, приходящееся на выборку сигнала, посылаемого от сенсора  $i$  к пункту наблюдения и контроля равно

$$H(N_k(0, K[T_i])) = \frac{1}{2} \log(2\pi e)^{|T_i|} \det(K[T_i]) - |T_i| \log \Delta. \quad (2.34)$$

где  $K[T_i]$  - матрица ковариации маршрута  $T_i$ , а  $|T_i|$  - количество сенсоров маршрута  $T_i$ .

Определим с учетом выражений (2.28), (2.29), (2.30), (2.34) оптимальное размещение сенсоров в одномерном случае для маршрута передачи данных по наикратчайшему пути.

$$\begin{aligned} \{r_i\}_{i=1}^N &= \arg \min_{r_i} \sum_{i=1}^N [H(X_i, X_{i+1}, \dots, X_N) r_i^k] = \\ &= \arg \min_{r_i} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{2} \log(2\pi e)^{(N-i+1)} \det(K[T_i]) - (N-i+1) \log \Delta \right] r_i^k \end{aligned} \quad (2.35)$$

где  $k$  – коэффициент затухания на пути  $r_i$ .  $k$  учитывает энергетические затраты, приходящиеся на организацию сеанса связи.

Считаем, что  $T_i$  - маршрут от узла  $i$  к ПНК заданный набором сенсоров  $\{i, i+1, \dots, N\}$ .

Для решения задачи возьмем случай, когда данные различных сенсоров являются независимыми друг от друга, то есть имеем нулевую корреляцию сигналов, следовательно  $\det(K[T_i])=1$  и оптимизация выражения (2.35) сведётся к

минимизации выражения  $\sum_1^N \left[ (N-i+1) \left( \frac{1}{2} \log(2\pi e) - \log \Delta \right) \right] r_i^k$ . Опустив

$\left(\frac{1}{2}\log(2\pi e) - \log \Delta\right)$  – постоянный масштабирующий коэффициент, который не влияет на процесс минимизации, получим:

$$\{r_i\}_{i=1}^N = \arg \min_{r_i} \sum_{i=1}^N (N-i+1)r_i^k. \quad (2.36)$$

Разберем выражение (2.36) на примере, рисунок 2.18. Пусть данные сенсоров 1,2 и 3 некоррелированные между собой, передача данных к ПНК сенсором осуществляется одним кадром (сенсор 3 передает один кадр данных сенсору 2, сенсор 2 передает уже два кадра данных, свой собственный и полученный от узла 3, а сенсор 1 передает уже три кадра данных.

Используя условия ограничения (2.28) выражение (2.30) преобразуется к виду:

$$\{r_i\}_{i=1}^N = \arg \min_{r_i} \sum_{i=1}^N (N-i+1)r_i^k - \lambda \left[ \sum_{i=1}^N r_i + r_N/2 \right], \quad (2.37)$$

где  $\lambda = \left[ \frac{L}{\sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{1}{k(N-i+1)} \right)^{-(k-1)} + \frac{3}{2} \left( \frac{3}{2k} \right)^{-(k-1)}} \right]^{k-1}$  – множитель Лагранжа. (2.38)

Решение уравнения (2.38) найдем в частных производных.

$$r_i = \left[ \frac{\lambda}{k(N-i+1)} \right]^{-(k-1)}, (\forall) 2 \leq i \leq N \quad (2.39)$$

$$r_N = \left[ \frac{3\lambda}{2k} \right]^{-(k-1)}. \quad (2.40)$$

Двумерная модель структуры сети мониторинга изображена на рисунке 2.17 и имеет радиальную структуру.

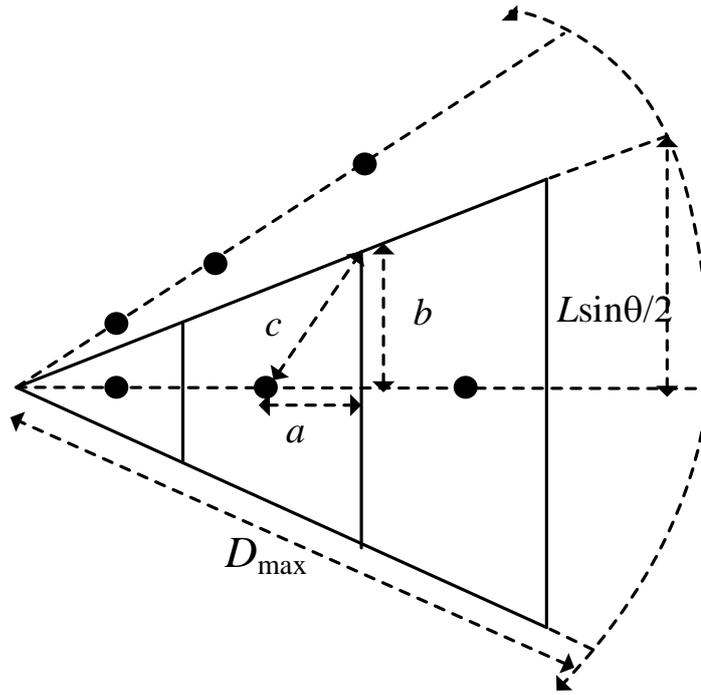


Рисунок 2.17 – Двумерная радиальная модель для сбора пространственно-распределенных данных

Радиальная модель содержит в себе окружности содержит  $n_R$  радиусов, где каждый радиус будет содержать  $n_c$  сенсоров. Передача данных от каждого сенсора происходит вдоль того радиуса, на котором он расположен. Получаем, что максимальное искажение сигнала в рамках данной модели будет соответствовать сигналу, полученному из самой дальней точки ячейки Вороного, которая располагается в углу ячейки. Поскольку радиальная модель имеет симметричную структуру сети мониторинга, то ячейки Вороного на каждом радиусе будут одинаковы.

Найдем максимальное искажение, для этого возьмем треугольник со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , рисунок 2.17., который сформирован сенсором и точкой, лежащей в углу ячейки Вороного, соответствующей максимальному искажению сигнала, тогда (2.25) удовлетворяется, если

$$c \leq R_{\max}. \quad (2.41)$$

Так как все радиусы наблюдаемой поверхности  $A$  равны  $L$ , следовательно, угол между любыми двумя соседними радиусами будет равен

$$\theta = \left( \frac{2\pi}{n_R} \right) \text{ и } b \leq L \sin \left( \frac{\theta}{2} \right). \quad (2.42)$$

Исходя из этого можем записать условие удовлетворяющее неравенство (2.41) в следующем виде:

$$a \leq \sqrt{R_{\max}^2 - L^2 \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right)}. \quad (2.43)$$

Для того, чтобы не превысить максимального расстояния между сенсорами  $R_{\max}$ , в случае двумерной структуры сети мониторинга, необходимо располагать сенсоры вдоль каждого радиуса таким образом, чтобы максимальное расстояние вдоль каждого радиуса ограничивалось величиной

$$\bar{R}_{\max} = \sqrt{R_{\max}^2 - L^2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{n_R} \right)}, \quad (2.44)$$

где величину  $\bar{R}_{\max} = r_i$  можно найти, используя опираясь на выражения для одномерного случая.

Выражение (2.44) позволяет найти компромисс между оптимальным выбором количества радиусов  $n_R$  и количеством сенсоров, расположенных на каждом радиусе  $n_c$ , в двумерной сети мониторинга. В случае одномерной сети увеличение значения  $n_c$  или  $\bar{R}_{\max}$ , приводит к экономии энергии в сети мониторинга. Однако в двумерном случае увеличение значения  $n_c$  приведет к уменьшению  $n_R$  и  $\bar{R}_{\max}$ , отсюда имеем, что следует выбирать оптимальное значение количества  $n_c$  для экономии энергии в сети мониторинга.

Таким образом, был разработан алгоритм оптимизации геометрии

многосенсорной сети мониторинга. Данный алгоритм оптимизации учитывает то, что искажение сигнала, измеряемого сенсорами, при его восстановлении на пункте наблюдения и контроля будет зависеть от количества сенсоров в сети мониторинга и степени корреляции между данными сенсоров. Эту составляющую будем называть «пространственным искажением».

Поскольку посылка данных от сенсора к пункту наблюдения и контроля напрямую является энергозатратной на большие расстояния, а аккумуляторы сенсоров обладают конечной энергией, то наилучшей способом организации трафика в сети мониторинга является ретрансляция данных с помощью соседних сенсоров [90]. Однако такая маршрутизация данных приводит к временной задержке сигнала, который должен поступать на пункт наблюдения и контроля в режиме реального времени. Следовательно, можно говорить о «временном искажении» сигнала, поступающего на ПНК по маршруту с использованием ретрансляторов [4].

При условии одновременного существования пространственных и временных искажений сигнала необходимо рассмотреть проблему оптимизации структуры многосенсорной сети мониторинга.

Запишем модель одномерной корреляционной пространственно-временной структуры сигнала:

$$E[X(x, t_1)X(x_0, t_2)] = f(|x - x_0|, |t_1 - t_2|) = \exp(-\alpha((x_1 - x_2)^2 + \beta^2(t_1 - t_2)^2)) \quad (2.45)$$

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  $x_0$ ;

$\alpha$  – константа коэффициента корреляции сигналов;

$\beta$  – константа, масштабирующая ось времени.

При использовании ретрансляторов количество отрезков маршрута будет равно  $k = \beta t_k$ , где  $t_k$  – задержка сигнала сенсора при передаче сигнала из точки  $x_0$  в точку нахождения ПНК.

Пусть  $T$  – задержка на каждом отрезке маршрута с использованием ретрансляторов является постоянной, тогда  $t_k = kT$  и СКО сигнала, восстанавливаемого на ПНК, будет равна

$$\begin{aligned} D &= E[(X(x, t_1) - X(x_0, t_1 + kT))^2] = \\ &= E[X(x, t_1)^2] + E[X(x_0, t_1 + kT)^2] - 2E[X(x, t_1)X(x_0, t_1 + kT)] = 2 - 2f(|x - x_0, t_1 + kT|) \\ &= 2 - 2\exp(-\alpha((x_1 - x_2)^2 + (\beta kT)^2). \end{aligned} \quad (2.46)$$

Пусть  $k$ -й сенсор наблюдает за зоной ответственности, расположенной в границах  $\left[x_k - \frac{r}{2}; x_k + \frac{r}{2}\right]$ , тогда  $\left[-\frac{L}{2N}; \frac{L}{2N}\right]$  – границы зоны ответственности всей сети мониторинг, где  $L$  – протяженность одномерной сети мониторинга,  $N$  – количество сенсоров.

Отсюда величина искажения сигнала  $k$ -го сенсора, расположенного в точке  $x_k=0$ , при восстановлении на ПНК можно быть записана:

$$D_k(N) = 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - f(x, kT)) dx. \quad (2.47)$$

Величина искажения сигналов всех датчиков, восстанавливаемых ПНК равна

$$D(N) = \sum_{k=0}^{N-1} 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - f(x, kT)) dx = \sum_{k=0}^{N-1} 4 \int_0^{\frac{L}{2N}} (1 - \exp(-\alpha((x_1 - x_2)^2 + (\beta kT)^2)) dx. \quad (2.48)$$

Решив уравнение  $D'(N)=0$  найдем оптимальное с точки зрения минимизации пространственно-временных искажений значение количества сенсоров в сети мониторинга.

Допустим, что в разрабатываемой системе данные сенсоров в сети мониторинга сильно взаимосвязаны друг с другом (коррелированы) в

пространстве и во времени. Тогда

$$1 - \exp(-\alpha(x^2 + \beta^2(\beta kT)^2)) \approx 1 - (1 - \alpha(x^2 + \beta^2(\beta kT)^2)) = \alpha(x^2 + \beta^2(\beta kT)^2), \quad (2.49)$$

$$\int_0^{\frac{L}{2N}} \alpha(x^2 + \beta^2(kT)^2) dx = \alpha \left( \frac{L^3}{24N^3} + \frac{L(\beta kT)^2}{2N} \right). \quad (2.50)$$

С учетом выражения (2.48), получим:

$$D(N) = \alpha \left( \frac{L^3}{6} \frac{1}{N^2} + \frac{2L(\beta T)^2}{3} N^2 - L(\beta T)^2 N + \frac{1}{3} L(\beta T)^2 \right). \quad (2.51)$$

Возьмем частную производную по  $N$  от выражения (2.51) и приравняем нулю. Получим:

$$4N^4 - 3N^3 - c = 0. \quad (2.52)$$

где  $c = \frac{L^2}{\beta^2 T^2}$ .

При условии  $c > 0$ , выражение (2.52) будет иметь единственное решение, рисунок 2.18.

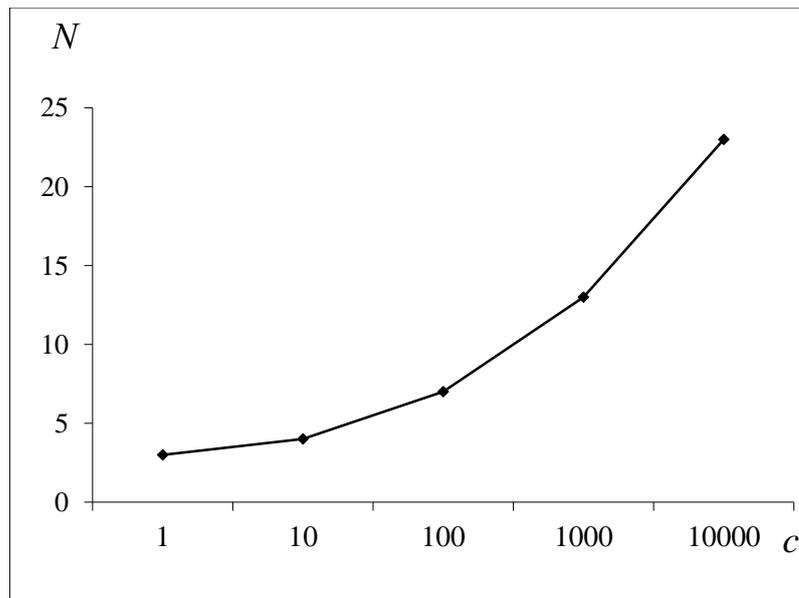


Рисунок 2.18 – Оптимальное количество сенсоров в одномерной БСС как функция параметра  $c = \frac{L^2}{\beta^2 T^2}$  для модели сильной корреляции данных

Проанализируем двумерную модель сети мониторинга, рисунок 2.19. Рассматриваемая в данной модели зона ответственности сети мониторинга фактически является областью квадратной формы размером  $L \times L$ , внутри которой равномерно размещено  $N^2$  сенсоров, каждый из которых расположен в центрах ячеек Вороного. Для выбора маршрута передачи данных от сенсоров в ПНК использован алгоритм наикратчайшего пути. В связи с тем, что данные от сенсоров взаимосвязаны (коррелированы) между собой в пространстве, оптимальным направлением передачи данных не является кратчайший путь между сенсорами, так как в этом случае энергетические затраты не являются оптимальными, но в рассматриваемой модели полагаем, что составные узлы являются нерегативными трансляторами (передают данные без обработки). Следующим допущением принимаем то, что передача данных из ячейки Вороного в ПНК происходит без задержки. Из рисунка 2.19 видно, что для каждого  $k = 0 \dots N-1$  существует  $8k$  ячеек Вороного, которые расположены на удалении  $k$  отрезков маршрута от ПНК. Исходя из этого, для искажения сигналов всех датчиков, восстанавливаемых на ПНК, можно записать:

$$D(N) = \sum_{k=0}^{N-1} 4 \cdot 8k \int_{x=0}^{\frac{L}{2N}} \int_{y=0}^{\frac{L}{2N}} (1 - \exp(-\alpha(x^2 + y^2 + (\beta kT)^2))) dy dx, \quad (2.53)$$

где  $N$  – количество отрезков маршрута от ПНК до максимально удаленного сенсора сети мониторинга.

Для модели сильной пространственно-временной корреляции данных сенсоров

$$1 - \exp(-\alpha(x^2 + y^2 + (\beta kT)^2)) \approx \alpha(x^2 + y^2 + (\beta kT)^2). \quad (2.54)$$

Решив уравнение  $D'(N)=0$  при  $k=1$  в частных производных имеем:

$$N^5 - N^4 - \frac{c}{3}N + \frac{c}{2} = 0, \quad (2.55)$$

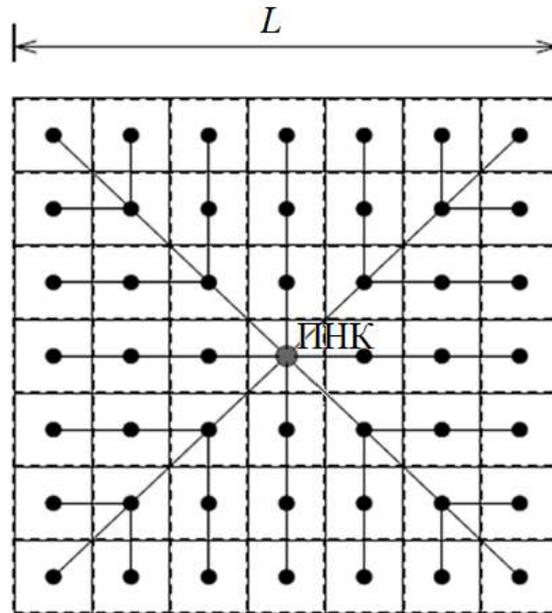


Рисунок 2.19 – Двумерная модель БСС (сплошная линия – маршрут трафика по алгоритму наикратчайшего пути, пунктирная линия – ячейки Вронского)

Проведенное численное моделирование на основе уравнения (2.55) дает, что при попадании значения  $c$  в промежуток от 0 до 83,9 функция быстро возрастает, как следствие уравнение  $D'(N)=0$  не будет иметь положительного решения. Следовательно, сбор данных в сети мониторинга не является оптимальным из-за возникающих больших временных искажений, вызванных задержкой сигнала передаче данных по маршруту ретрансляции. Оптимальный с точки зрения минимизации пространственно-временных искажений мониторинг зоны ответственности в этом случае должен осуществляться одним сенсором, расположенным в точке ПНК.

При  $c \geq 83,9$  уравнение  $D'(N)=0$  будет иметь два положительных решения:

–  $N_1 \in (1,2)$  - максимум функции  $N^5 - N^4 - \frac{c}{3}N + \frac{c}{2}$

–  $N_2 > 2$  - минимуму функции  $N^5 - N^4 - \frac{c}{3}N + \frac{c}{2}$ .

На основе проведенного численного моделирования можно сделать вывод, что в данном случае в двумерной сети мониторинга существует маршрут передачи данных, являющийся оптимальным с точки зрения минимизации пространственно-временных искажений сигнала.

### Выводы по второй главе

1. Сформулирована проблема оптимизации расположения сенсоров в распределенной многосенсорной системе мониторинга включающая в себя решение задачи нахождения оптимального расположения сенсоров БСС с точки зрения полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков и задачи нахождения оптимального расположения сенсоров в сети мониторинга с точки зрения оптимизации информационных потоков в сети мониторинга. Результаты представлены в опубликованных работах [44, 68, 69]

2. Произведен расчет зоны покрытия датчиками зоны ответственности беспроводной сенсорной сети и минимизации зоны нечувствительности БСС. При расчетах использовались детерминистские и вероятностные модели. Результаты представлены в опубликованных работах [49]

3. Разработан алгоритм совместной оптимизации расположения сенсоров и информационных потоков в БСС в допустимых границах искажения сигнала. Результаты представлены в опубликованных работах [68] и в виде программы создания сплошного сенсорного поля на территории с естественными препятствиями [40].

4. Построена зависимость оптимального количества сенсоров в одноранговой БСС как функция параметра протяженности БСС для случаев

сильной и слабой корреляции данных. Результаты представлены в опубликованных работах [49]

### 3. АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

При поиске оптимального маршрута будем считать, что маршрутов доставки данных от И-узла к А-узлу несколько. Каждый маршрут является последовательностью транзитных участков, каждый из которых характеризуется пропускной способностью, расстоянием, производительностью Т-узлов, состоянием узлов (активность/сон). Каждый из транзитных участков влияет на общее время доставки данных и, соответственно, выбор оптимального маршрута.

#### 3.1. Протоколы маршрутизации для одноранговых БСС

Для передачи данных от источника адресату в одноранговой БСС могут быть задействовано различное количество узлов. Специальные протоколы БСС занимаются определением маршрутов передачи данных. Алгоритмы этих протоколов схожи с алгоритмами маршрутизации в компьютерных сетях, однако параметры, учитываемые для построения маршрутов в БСС другие.

##### 3.1.1. Алгоритм маршрутизации по требованию на основе вектора расстояний

Топология БСС подвижная – меняется во времени из-за своих динамичных свойств. Вместе с этим будут меняться и пути доставки данных от И-узла к А-узлу. Поэтому необходимо периодически обновлять таблицу маршрутизации и выполнять по ней поиск эффективных маршрутов.

В одноранговых БСС (Mesh сетях), которые являются объектом исследования применяется алгоритм AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector), основанный на периодической оценке вектора расстояний по требованию узла, инициировавшего передачу данных. Алгоритме AODV развивает идеи алгоритма поиска кратчайших путей на графе Беллмана-

Форда, но с некоторой адаптацией под свойства беспроводных сенсорных сетей. Маршрут будет вычисляться только при возникновении данных, требующих доставки от И-узла к А-узлу.

Представим БСС в виде графа на рисунке 3.1. На каждом узле БСС иницируется локальная таблица маршрутизации, в которую записывается адрес А-узла, адреса соседних узлов (находящихся на расстоянии одного скачка – хопа). Если И-узел при обращении к своей локальной таблице маршрутизации не обнаруживает среди соседей А-узла, то запускается процедура поиска эффективного маршрута к А-узлу.

Алгоритм процедуры поиска эффективного маршрута работает следующим образом [91]:

Шаг 1. Когда И-узлу необходимо отправить пакет А-узлу, то И-узел иницирует процесс установления соединения рассылая широковещательный пакет ROUTE REQUEST с запросом маршрута к А-узлу (рисунок 3.1).

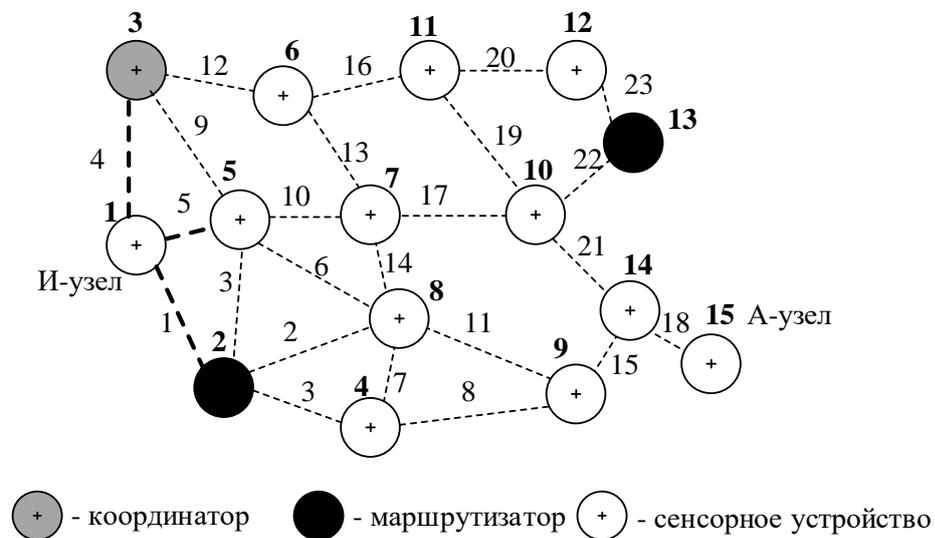


Рисунок 3.1 – Демонстрация выполнения шага 1 алгоритма AODV

Пакет ROUTE REQUEST будет принят узлами 2, 3 и 5.

На рисунке 3.2 приведен формат пакета ROUTE REQUEST.

Адрес отправителя	Идентификатор запроса	Адрес получателя	Порядковый номер отправителя	Порядковый номер получателя	Счетчик переходов
-------------------	-----------------------	------------------	------------------------------	-----------------------------	-------------------

Рисунок 3.2 – Формат пакета ROUTE REQUEST

Поле «Адрес отправителя» содержит физический или IP-адрес И-узла, поле «Адрес получателя» – физический или IP-адрес А-узла. В поле «Идентификатор запроса». Поле «Идентификатор запроса» хранит код пакета ROUTE REQUEST. Значение таймера является той характеристикой, в соответствии с которой происходит сравнение маршрутов. В поле «Порядковый номер отправителя» записывается последний номер пакета, отправленный И-узлом. В поле «Порядковый номер получателя» записывается последний номер пакета, принятый А-узлом. В поле «Счетчик переходов» накапливается число скачков на маршруте от И-узла к А-узла, которое увеличивается на единицу в каждом Т-узле маршрута.

Шаг 2. При получении запроса на установление маршрута, Т-узел записывает в таблицу маршрутизации свою запись и транслирует его следующему соседнему узлу.

Пакет ROUTE REQUEST, принимаемый узлом, например, узлом 5 (рисунок 3.2) инициирует следующую последовательность действий:

1. Узел обращается к своим архивным данным с целью обнаружения в них сочетание значений полей «Адрес источника» и «Идентификатор запроса». Если сочетание этих значений обнаруживается в архивных данных, то пакет ROUTE REQUEST игнорируется, иначе сочетание значений полей «Адрес источника» и «Идентификатор запроса» сохраняется в архиве. Переход к следующему действию.

2. Узел обращается к таблице маршрутизации с целью обнаружения адреса назначения. Если появился новый эффективный маршрут, то текущий Т-узел генерирует пакет ROUTE REPLY с помощью которого сообщает И-узлу о новом эффективном маршруте. Формат пакета ROUTE REPLY показан на рисунке 3.3. Сведения о новом эффективном маршруте появляются в результате сравнения значений поля «Порядковый номер получателя» в записи таблицы маршрутизации (значение 1) и этого же поля пакета ROUTE REQUEST (значение 2). Если (значение 1)  $\geq$  (значение 2), то через текущий Т-узел построен новый эффективный маршрут, иначе – маршрут А-узлу не

актуален. При этом в поля пакета ROUTE REPLY «Адрес отправителя», «Адрес получателя» и «Счетчик переходов» переносятся значения из соответствующих полей пакета ROUTE REQUEST, в поле «Порядковый номер получателя» записывается номер последнего принятого пакета, в поле «Счетчик переходов» записывается нулевое значение, в поле «Время существования» будет установлен таймер для управления маршрутом. Пакет ROUTE REPLY с заполненными полями отправляется на узел, с которого пришел пакет ROUTE REQUEST.

Переход к следующему действию.

Адрес отправителя	Адрес получателя	Порядковый номер получателя	Счетчик переходов	Время существования
-------------------	------------------	-----------------------------	-------------------	---------------------

Рисунок 3.3 – Формат пакета ROUTE REPLY

3. Текущий узел не обладает полной информацией о новом маршруте к А-узлу, поэтому вновь распространяет пакет ROUTE REQUEST широковещательным способом. Из пакета извлекаются значения полей с адресами для построения обратного маршрута с целью отправки по нему пакета подтверждения о доставке данных. На время хранения записи об обратном маршруте запускается таймер. При истечении тайм-аута запись будет удалена.

На рисунке 3.4 стрелки демонстрируют построение обратного маршрута от узлов 2, 3 и 5 к И-узлу. Каждый из этих узлов широковещательным способом доставляет пакет со значением счетчика переходов к И-узлу.

Шаг 3. Очередной Т-узел, получивший ретранслированный запрос с маршрутной таблицей, отправляет его дальше, и с каждым скачком вектор расстояния увеличивается на величину, характеризующую транзитный участок.

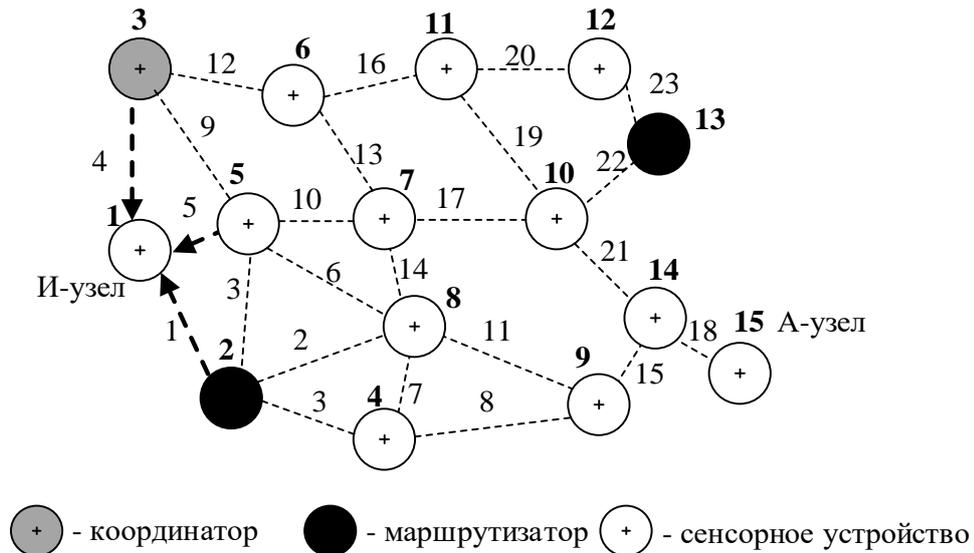


Рисунок 3.4 – Построение обратного пути

Пакет ROUTE REQUEST от 2-го узла доставляется узлам 8 и 4. Узел 4 переписывает данные из пакета в таблицу обратных путей и ретранслирует его на узлы 8 и 9. Для узла 8 этот пакет является дубликатом, поскольку точно такой же был получен от узла 2, поэтому пакет будет отвергнут. В свою очередь, узел 4 получит дубликат пакета от узла 8 и тоже не будет передавать его дальше. Узел 9 примет пакет ROUTE REQUEST, сохранит необходимые из него данные в своей локальной памяти и отправит соседнему узлу 14. Таким образом, процесс ретрансляции пакета ROUTE REQUEST продолжается до тех пор, пока он не будет доставлен А-узлу. В итоге, в А-узел через разные Т-узлы будут доставлены несколько пакетов ROUTE REQUEST, свидетельствующие о наличии нескольких маршрутов.

Значение поля «Счетчик переходов» пакета ROUTE REQUEST инкрементируется при приеме пакета в транзитных узлах маршрута, так что И-узел оценивает вектор расстояний до А-узла.

Шаг 4. Ответ на запрос эффективного маршрута А-узел отправляет на И-узел по маршруту с минимальным векторным расстоянием.

Шаг 5. Пакет с ответом на запрос эффективного маршрута проверяется транзитными узлами. Запись о маршруте к А-узлу транзитный узел заносит в свою локальную таблицу маршрутизации при выполнении хотя бы одного из

условий:

1. Этот маршрут к А-узлу единственный.
2. Значение поля «Последовательный номер» пакета ROUTE REPLY равно значению в таблице маршрутизации, но новый путь короче.
3. Значение поля «Последовательный номер» пакета ROUTE REPLY больше значения в таблице маршрутизации.

Таким образом, Т-узлы эффективного маршрута при обратном распространении пакета ROUTE REPLY получают информацию о маршруте к А-узлу. Другие Т-узлы, через которые получили пакет ROUTE REQUEST, но не получившие пакет ROUTE REPLY, например, узлы 10, 7, 5 с истечением тайм-аута удаляют запись о возможном маршруте из своей локальной таблицы маршрутизации.

Таким образом, ответ, отправляемый в обратном направлении формирует прямой маршрут для передачи пакетов с данных от И-узла к А-узлу (рисунок 3.5).

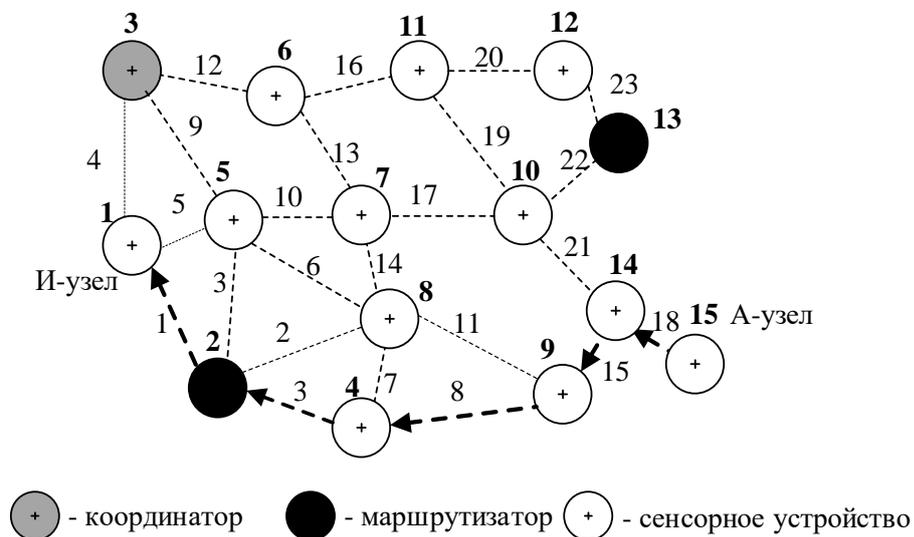


Рисунок 3.5 – Обратный маршрут

Поскольку топология беспроводной сенсорной сети периодически меняется, то есть необходимость получения координатором и маршрутизаторами информации об актуальной топологии для построения

эффективных маршрутов доставки данных. Поэтому периодически узлы БСС отправляют своим соседям сообщение приветствия HELLO. Узлы, ответившие на приветствие, считаются активными. При отсутствии ответа от какого-либо соседнего узла инициируется процедура удаления маршрутов, которые ранее проходили через недоступный соседний узел – узел сообщает эту информацию своим активным соседям, а активные соседи своим активным соседям, и так далее, пока все маршруты, в которых участвовали недоступные узлы, не будут удалены из локальных таблиц маршрутизации.

Предположим, что узел 4 стал недоступным. При обновлении сведений о маршрутах узел 2, соответственно, не сможет получить доступ к своему соседу - узлу 4, и тогда узел 2 обращается к локальной таблице маршрутизации с целью выявления маршрутов, в которых используется узел 4. Таким маршрутом является последовательность узлов 1-2-4-9-14-15. Следовательно, узлы необходимо проинформировать об отсутствии данного маршрута. Узел 2 рассылает специальные пакеты узлам 1, 9, 14 и 15 с запросом на обновление их локальных таблиц маршрутизации, и, соответственно, сам удаляет записи с маршрутами через узел 4.

Реализация алгоритма AODV в одноранговой БСС (Mesh сети) требует ресурсов для хранения локальных таблиц маршрутизации на каждом узле, что приводит к удорожанию узлов БСС.

### 3.1.2. Алгоритм маршрутизации на основе иерархии адресов

Известный алгоритм маршрутизации для сетей ZigBee основан на иерархии адресов, начиная с корневого узла – координатора.

При самоорганизации сети ZigBee, сначала узлам назначаются адреса согласно выделенному диапазону адресов по иерархическому принципу, начиная с координатора наподобие системе адресов DNS. Далее И-узел определяет принадлежность адреса А-узла к нисходящей ветке или восходящей ветке иерархической адресной системы. Если адрес А-узла

находится ниже адреса И-узла, то пакет ретранслируется ближайшему дочернему Т-узлу на пути к А-узлу. Если адрес А-узла находится выше адреса И-узла, то пакет ретранслируется ближайшему родительскому Т-узлу на пути к координатору.

Пример маршрутизации на основе иерархии адресов приведен на рисунке 3.6.

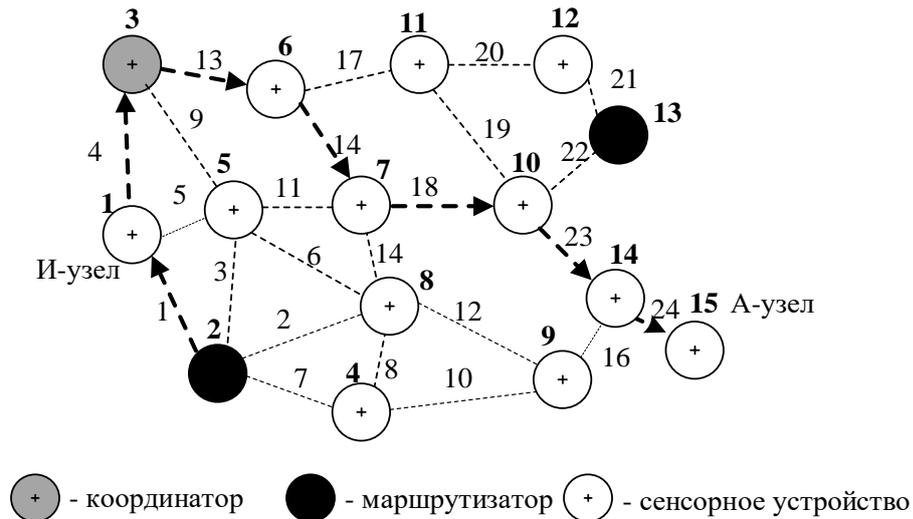


Рисунок 3.6 – Иерархическая маршрутизация

Положительным качеством алгоритма иерархической маршрутизации является его идентичность с алгоритмом маршрутизации для компьютерных сетей и меньшим расходом ресурсов памяти, что позволяет использовать для некоторых задач БСС недорогие сенсорные устройства [86]. Правила, по которым работает иерархический алгоритм маршрутизации не позволяют И-узлу и А-узлу взаимодействовать по очевидному прямому короткому пути, то есть пакеты с данными будут отправляться до координатора и от него. Недостаток алгоритма проявляется именно в такой ситуации.

### 3.2. Построение таблицы маршрутизации

Известны два метода построения маршрутных таблиц: вероятностный и детерминированный. Вероятностный метод подразумевает наличие

коллизий при отправке узлами пакетов с информацией, необходимой для построения таблицы маршрутизации. Поэтому, если через узел 7 БСС, изображенной на рисунке 3.7 раньше придет пакет от узла 8, то маршрут через узел 5 будет считаться резервным, а через узел 8 – кратчайшим. Детерминированный метод подразумевает отсутствие возникновения коллизий, поскольку для опроса каждого узла выделяется свое временное окно. В итоге все узлы будут опрошены и построено дерево всех возможных маршрутов узлов до любого узла назначения.

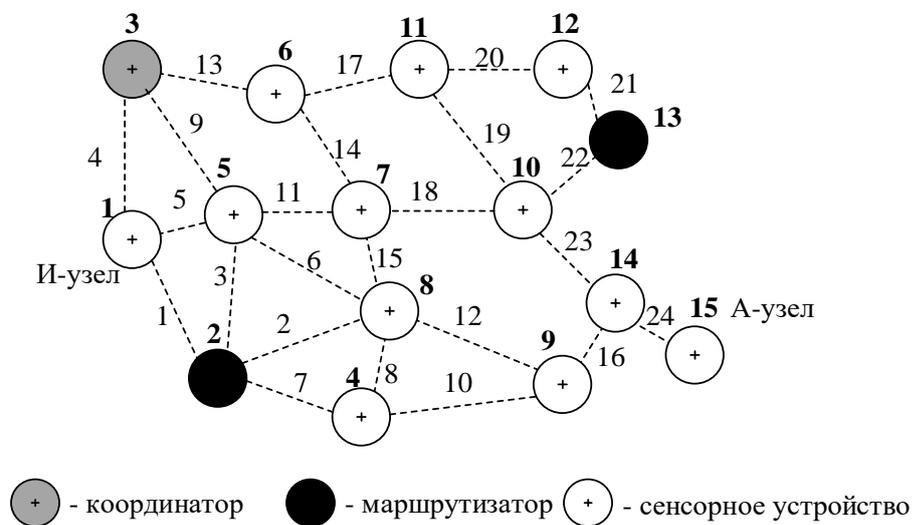


Рисунок 3.7 – К построению маршрутов от И-узла к А-узлу

Процесс построения таблицы маршрутизации начинается с широковещательной рассылки пакета инициализации от центрального узла, например маршрутизатора или координатора.

При реализации вероятностного метода построения таблицы маршрутизации узлы, получившие пакет инициализации, записывают в свою локальную память уникальный номер беспроводной сенсорной сети, адрес координатора и адрес источника рассылки – родительского узла, от которого непосредственно получен пакет инициализации.

Узел, принявший пакет инициализации начинает формировать пакет подтверждения, в котором конечным адресатом указывается центральный узел, а промежуточным адресатом – родительский узел.

Любой узел, получающий пакет подтверждения, считывает из него адрес промежуточного узла и сравнивают его с собственным адресом. Если адреса не совпадают, то вместо считанного промежуточного адреса узел записывает адрес своего родительского узла и т.д., пока пакет подтверждения не достигнет центрального узла.

При получении пакетов подтверждений в центральном узле начинается процесс регистрации узлов и строится топология БСС типа «дерево», на базе которой строится таблица маршрутизации.

Для БСС, приведенной на рисунке 3.7 топология, построенная от узла 2 (маршрутизатора БСС) приведена на рисунке 3.8 и топология, построенная от узла 13 (маршрутизатора БСС) приведена на рисунке 3.9. Пунктирной линией выделены возможные узлы и каналы, которые подвергаются коллизиям.

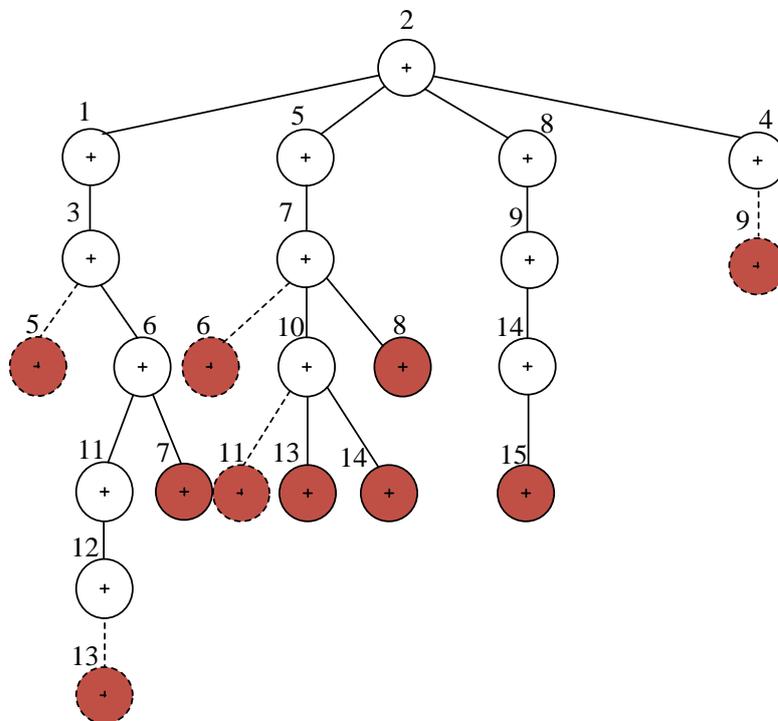


Рисунок 3.8 – Дерево маршрутов, построенных от маршрутизатора 2

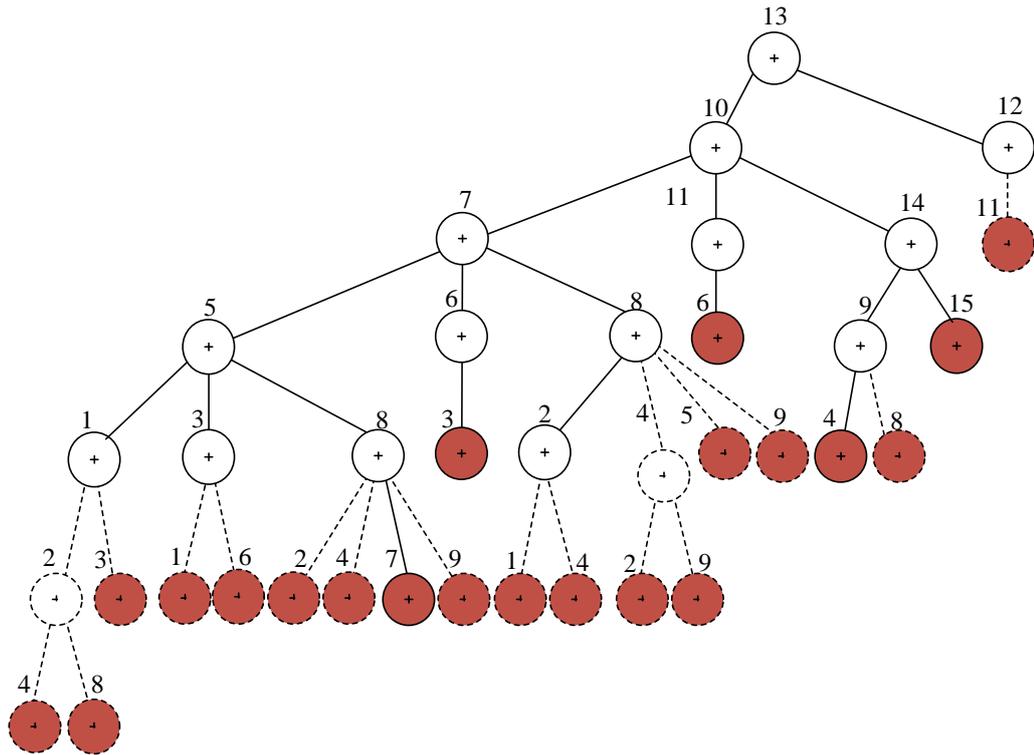


Рисунок 3.9 – Дерево маршрутов, построенных от маршрутизатора 13

При передаче пакетов подтверждений возможны случаи возникновения коллизий – когда два и более пакета в один и тот же промежуток времени передаются на один узел. Для устранения коллизий пакетов применяется метод множественного доступа с контролем несущей CSMA (Carrier Sense Multiple Access). При возникновении условий для передачи данных, узел начинает прослушивать канал передачи с целью определения состояния канала – свободен или занят. Прослушивание продолжается в течение временного окна  $\tau$ , с. Если канал свободен, то узел начинает передачу данных длиной  $L$  (размер пакета, бит) со скоростью канала  $V$  бит/с. После передачи данных узел еще определенное время  $\theta$ , с занимает канал – это время выделяется для приема пакета принимающим узлом. Если канал занят, то узел ожидает случайное время  $\sigma > L/V + \theta$  и делает повторную попытку прослушивания канала. Число попыток может быть ограничено. По их истечении пакет считается потерянным или отправляется по резервному пути [93].

Таким образом, время построения таблицы маршрутизации вероятностным методом составит

$$t_{r.p} = \sum_{i=1}^n \frac{L}{V_i} + \sum_{i=1}^n \left( \tau + \frac{L}{V_i} + \theta \right) + \sum_{j=1}^k (\tau + \sigma), \quad (3.1)$$

где  $n$  – число хопов (ретрансляций) от центрального узла до самого удаленного узла БСС;

$k$  – число повторных передач пакета подтверждения при возникновении коллизии.

Процесс построения таблицы маршрутизации начинается с отправки центральным узлом (координатором или маршрутизатором) пакета инициализации всем узлам БСС. Узлы отвечают пакетом подтверждением, но не все сразу, а по каскадной схеме. Центральный узел сначала вносит запись в таблицу маршрутизации об узлах первого круга – узлах, находящихся на расстоянии одного скачка от центрального узла. При этом опрос узлов первого круга происходит последовательно. В свою очередь каждый узел первого круга рассылает пакет инициализации своим соседям – узлам, находящимся на расстоянии одного скачка от него и также последовательно принимает от них пакет подтверждения, заносит нужную информацию в свою локальную таблицу маршрутизации и передает пакет выше на центральный узел. Опрос узлов второго и последующих кругов происходит аналогично. Таблица маршрутизации считается построенной, когда опрошены все узлы БСС. Очевидно, что процесс построения таблицы маршрутизации занимает достаточное время, которое зависит от масштаба БСС и технических возможностей узлов БСС.

Если считать на рисунке 3.10, что функции построения таблицы маршрутизатора выполняет узел 2, то узлами первого круга, получающими пакет инициализации, будут узлы 1, 4, 5 и 8. Затем узел 2 последовательно спрашивает эти узлы и получает информацию об их ближайших соседях – узлах 3, 7 и 9. Затем центральный узел, опросив каждый из узлов второго круга определяет узлы третьего круга – 6, 10 и 14 и потом точно так же, опросив

узлы третьего круга определяет узлы четвертого круга – 11 и 15, опросив узлы четвертого круга определяет узлы пятого круга – 12 и 13 и опросив узлы 12 и 14 центральный узел, не получив ответа, заканчивает построение таблицы маршрутизации.

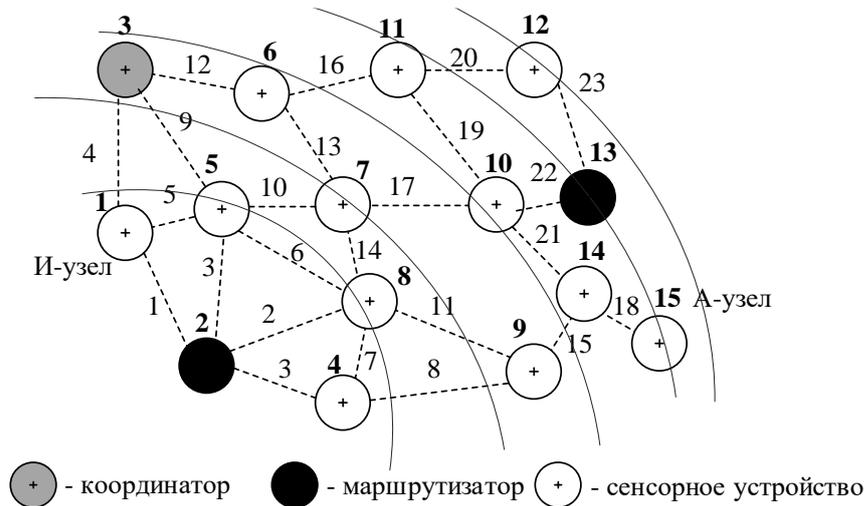


Рисунок 3.10 – К построению маршрутов детерминированным методом

На рисунке 3.11 приведено дерево маршрутов, построенных от узла 2 детерминированным методом. На рисунке 3.12 – от узла 13.

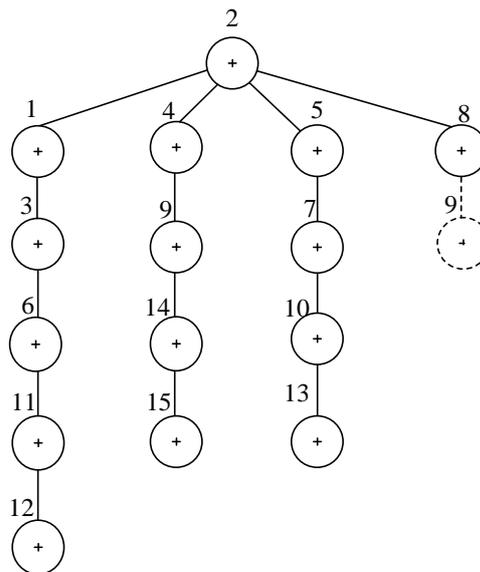


Рисунок 3.11 – Дерево маршрутов, построенных от маршрутизатора 2

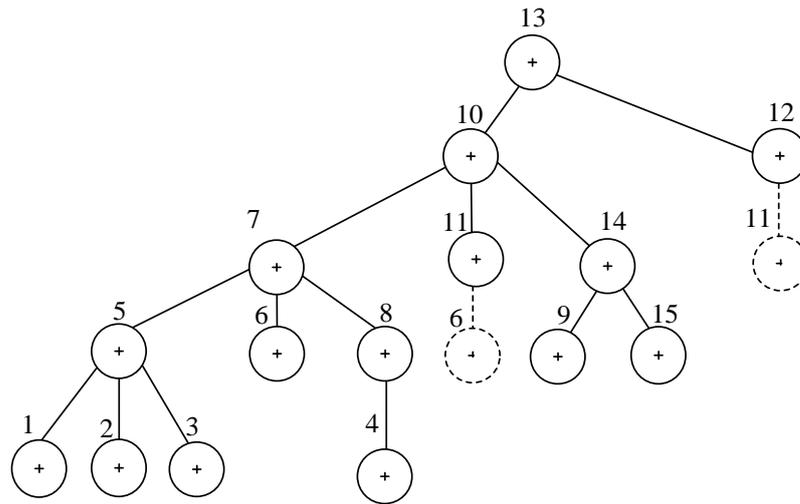


Рисунок 3.12 – Дерево маршрутов, построенных от маршрутизатора 13

Поскольку узлы опрашиваются последовательно центральным узлом, то коллизии возможны только при отправке пакетов подтверждения узлами БСС. Для разрешения коллизий предлагается использовать метод множественного доступа с разделением по времени TDMA (Time Division Multiple Access). Каждый узел посылает пакет только в свой временной слот [93].

Таким образом, время построения таблицы маршрутизации детерминированным методом составит

$$t_{r.d} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^m \frac{L}{V_j} + \sum_{j=1}^m \frac{L}{V_j}, \quad (3.2)$$

где  $h$  – число каскадов (кругов) опроса центральным узлом;

$m$  – число узлов в  $j$ -м круге.

### 3.3. Метод маршрутизации, основанный на контроллере нечеткой логики

Кроме времени передачи данных, что наиболее важно для компьютерных сетей, важным параметром, который необходимо учитывать

при выборе маршрута в БСС является уровень заряда аккумулятора Т-узлов. От этого параметра зависит общий энергетический ресурс сети и, соответственно, продолжительность жизненного цикла БСС [39,94].

Предлагается, чтобы при формировании таблицы маршрутизации на каждом Т-узле, записывался не только свой адрес и число промежуточных узлов (число скачков до адресата), но и уровень заряда аккумулятора. Таким образом, все узлы будут знать о количестве скачков и расходе энергии своих соседей. При необходимости можно учитывать и другие характеристики, влияющие на определение оптимального (рационального) маршрута также, можно их записывать в таблицу маршрутизации, например, пропускную способность, наличие очереди, состояние «активный» или «сон» – все зависит от того, насколько рационально расходовать энергии на запись этой информации и ее обработки.

Множество этих параметров подается на вход контроллера нечеткой логики, который представляет собой программу нечеткого вывода, реализованную в центральном узле, если реализуется маршрутизация на основе иерархии адресов или на каждом узле при реализации маршрутизации по требованию, на основе вектора расстояний.

Преимущество контроллера нечеткой логики заключается в его возможности учета множества влияющих на решение характеристик в отсутствии точной математической модели принятия решения и формализации решающих правил на языке, близком к естественному [31].

Контроллер нечеткой логики работает по принципу «черного ящика»: на входе и на выходе имеем количественные значения, а в самом «черном ящике» используется аппарат нечеткой логики. Таким образом сочетается возможность манипулирования числовыми данными и гибкого применения возможностей нечеткого вывода.

### 3.3.1. Структура контроллера нечеткой логики

Структуру любого контроллера нечеткой логики составляют: блок фаззификации (Ф), блок функции принадлежности, лингвистическую модель, модуль нечеткого вывода, и блок дефаззификации (Д). Структура контроллера нечеткой логики приведена на рисунке 3.13.

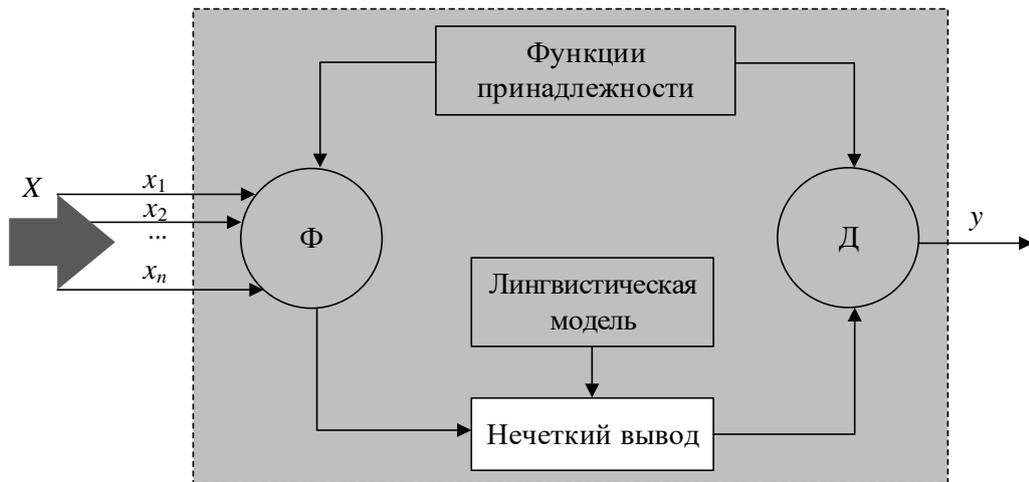


Рисунок 3.13 – Нечеткий контроллер

Фаззификация – это процесс интерпретации точных значений переменных в значения лингвистической переменной посредством функций принадлежности.

Лингвистическая переменная  $X$  задается конечным множеством слов или словосочетаний (термов), характеризующих ее свойства:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Например, лингвистическая переменная «уровень остаточной энергии» сенсорного узла может определяться через набор термов {низкий, средний, высокий}, образуя нечеткое множество.

Нечеткое множество (НМ) задается базовой шкалой  $B$ , по которой измеряется входная переменная  $X$  и функцией принадлежности  $\mu(X)$ ,  $X \in B$ , определяющей степень принадлежности конкретных значений  $X$  определенным термам.

$$B = \sum_n \frac{x_i}{\mu(x_i)}, \quad (3.3)$$

где  $x_i$  – значение базовой шкалы входной переменной;

$\sum_n$  – объединение по  $n$  термам конечного множества значений нечеткого множества (не сумма).

Выбор вида функции принадлежности и задание ее параметров являются "узким" местом в теории нечетких множеств. Анализ известных подходов к решению данной задачи показывает, что способом преодоления этой проблемы может служить редукция исходного множества классов функции принадлежности, результатом которой является ограниченное множество классов, предлагаемых экспертам для выбора и определения параметров. Экспертное оценивание представляется наиболее логичным подходом к определению вида и начальных параметров функции принадлежности.

В таблице 3.1 приведена известная классификация функций принадлежности.

В основе построения модуля нечеткого вывода лежит логическая модель в виде совокупности нечетких предикатных правил вида

$$\text{Rule: If } x \text{ is } \mu(x), \text{ Then } y \text{ is } \mu(y), \quad (3.4)$$

где  $x$  – имя входной переменной

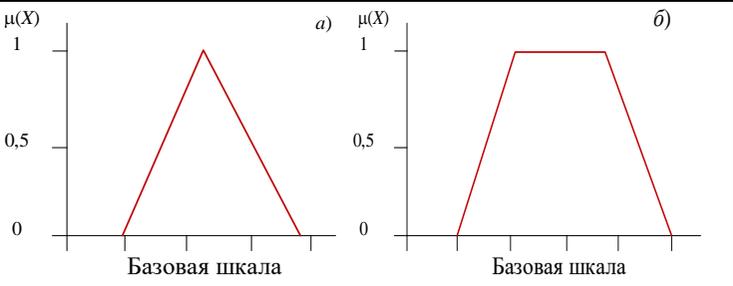
$y$  – имя переменной вывода,

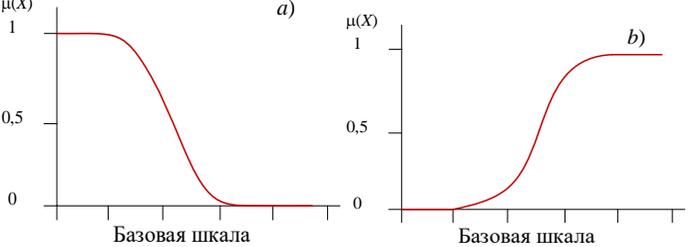
$\mu$  – заданная функция принадлежности

If  $\langle \dots \rangle$  – предпосылка правила;

Then  $\langle \dots \rangle$  – заключение правила.

Таблица 3.1 – Функции принадлежности

Функция принадлежности	График функции	Аналитическое выражение	Примечание
Кусочно-линейная $f_{\Delta}$	 <p data-bbox="465 678 967 746">Рисунок 3.14 – Кусочно-линейная <math>f</math>: <math>a</math> – треугольная; <math>b</math> – трапецевидная</p>	$f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq c \leq x \\ 0, & c \leq x, \end{cases}$ <p data-bbox="1099 662 1771 694">где <math>a, b, c</math> – упорядоченные параметры: <math>a \leq b \leq c</math>.</p>	Непрерывная (кусочно-непрерывная) функция образуется из линейных отрезков.
Z-образная $f_Z$	 <p data-bbox="526 1093 913 1133">Рисунок 3.15 – Z-образная <math>f</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1099 751 1771 941">• <math>f_Z(x; a, b) = \begin{cases} 1, &amp; x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), &amp; a \leq x \leq b \\ 0, &amp; x &gt; b \end{cases}</math></li> <li data-bbox="1099 957 1771 1244">• <math>f_Z(x; a, b) = \begin{cases} 1, &amp; x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, &amp; a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, &amp; \frac{a+b}{2} &lt; x &lt; b \\ 0, &amp; b \leq x, \end{cases}</math></li> </ul> <p data-bbox="1099 1268 1771 1303">где <math>a, b</math> – упорядоченные параметры: <math>a &lt; b</math>.</p>	Сплайн-функция, порождающая нормальные выпуклые нечеткие множества с ядром $(-\infty, a]$ и носителем $(-\infty, b)$ . Используется для ситуаций со слабой степенью проявления признака, типа "малое количество", "низкий уровень" и т.п.

<p>S-образная <math>f_S</math></p>	 <p>Рисунок 3.16 – S-образная <math>f</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_S(x; a, b) = \begin{cases} 0, &amp; x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), &amp; a \leq x \leq b \\ 1, &amp; x &gt; b \end{cases}</math></li> <li>• <math>f_S(x; a, b) = \begin{cases} 0, &amp; x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, &amp; \frac{a+b}{2} &lt; x &lt; b \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, &amp; a &lt; x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1, &amp; b \leq x, \end{cases}</math></li> </ul> <p>где <math>a, b</math> – упорядоченные параметры: <math>a &lt; b</math>.</p>	<p>Сплайн-функция, порождающая нормальные выпуклые нечеткие множества с ядром <math>[b, +\infty)</math> и носителем <math>[a, +\infty)</math>. Используется для ситуаций с высокой степенью проявления признака, типа "большое количество", "высокий уровень" и т.п.</p>
<p>Сигмоидальная <math>f_{Sig}</math></p>	 <p>Рисунок 3.17 – Сигмоид <math>f</math>: <math>a</math> – Z-образная; <math>b</math> – S-образная</p>	$f_{Sig}(x; a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}$ <p>где <math>a, b</math> – упорядоченные параметры <math>a &lt; b</math>; при <math>a &gt; 0</math> получается S-образная <math>f</math>, при <math>a &lt; 0</math> получается Z-образная <math>f</math>.</p>	<p>Функция принадлежности порождает субнормальные выпуклые нечеткие множества с точкой перехода <math>b</math>.</p>
<p>П-образная <math>f_{\Pi}</math></p>	 <p>Рисунок 3.18 – П-образная <math>f</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_S(x; a, b) \cdot f_Z(x; c, d)</math>, где <math>a \leq b \leq c \leq d</math>;</li> <li>• <math>f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_{Sig}(x; a, b) \cdot f_{Sig}(x; c, d)</math>, где <math>a \leq b &lt;  c  \leq d</math>, <math>a &gt; 0</math>, <math>c &lt; 0</math>;</li> <li>• <math>f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = \frac{1}{1 + \left \frac{x-c}{a}\right ^{2b}}</math>, где <math>a &lt; b &lt; c</math>, <math>b &gt; 0</math>;</li> <li>• <math>f_{\Pi}(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}</math>, где <math>\sigma</math> – дисперсия распределения; <math>c</math> – математическое ожидание.</li> </ul>	<p>Функция принадлежности порождает нормальные выпуклые нечеткие множества с носителем <math>(a, d)</math> и ядром <math>[b, c]</math>.</p>

Для каждого правила  $\text{Rule}_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  вычисляется значение истинности  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  предпосылки и применяется к заключению, что приводит к формированию нечетких подмножеств для всех термов лингвистической переменной  $Y = \{y_1, y_2, \dots, x_k\}$ . Формирование нечеткого подмножества  $y_i$  выполняется операцией МИНИМУМ или УМНОЖЕНИЕ. При использовании операции МИНИМУМА функция принадлежности выходной переменной «отсекается» по высоте, соответствующей значению  $\alpha$ , что соответствует нечеткой логике «И» (рисунок 3.19,а). При использовании операции УМНОЖЕНИЯ функция принадлежности выходной переменной масштабируется согласно значению  $\alpha$  (рисунок 3.19,б).

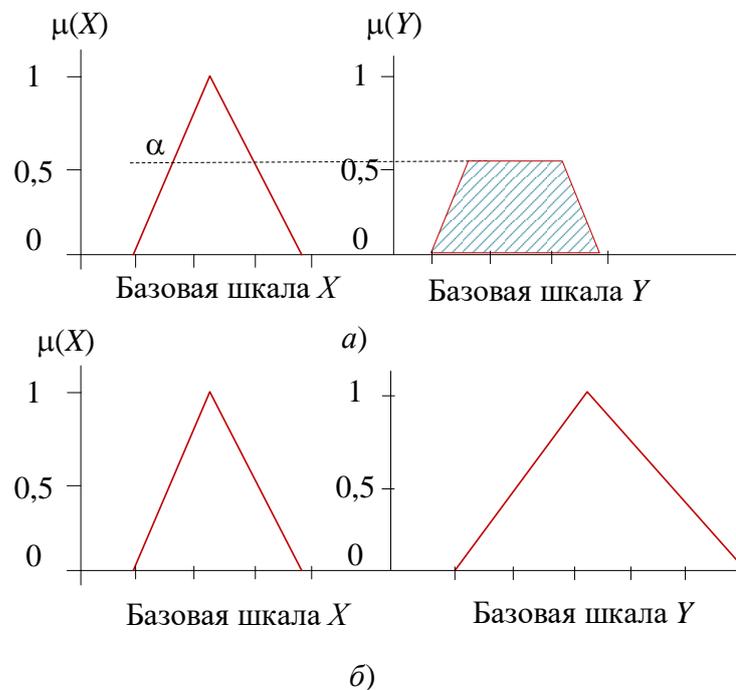


Рисунок 3.19 – Формирование лингвистической переменной нечеткого вывода

Далее нечеткие подмножества объединяются для получения одного нечеткого подмножества для каждой выходной лингвистической переменной  $y_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ . Данная процедура называется композицией и реализуется операцией МАКСИМУМ или СУММА. Композиция как операция МАКСИМУМ приводит к тому, что нечеткий вывод формируется выбором максимального

значения по всем нечетким подмножествам – нечеткая логика «ИЛИ». Композиция как операция СУММА приводит к тому, что нечеткий вывод формируется как сумма точек по всем нечетким подмножествам  $y_i, i = \overline{1, k}$ .

Дефаззификация – процесс обратный фаззификации – находится четкое значение выходной лингвистической переменной  $y_i, i = \overline{1, k}$  исходя из результата композиции функции принадлежности.

Известны следующие методы дефаззификации:

– Центр тяжести или центроид площади:

$$y = \frac{\int_{i=\min}^{i=\max} y_i \mu(y_i) dy_i}{\int_{i=\min}^{i=\max} \mu(y_i) dy_i}, \quad (3.5)$$

где  $y_i$  – значение  $i$ -й выходной лингвистической переменной;

$\mu$  – функция принадлежности выходной лингвистической переменной;

$\min$  и  $\max$  – границы интервала носителя нечеткого множества выходной лингвистической переменной.

– Центр тяжести для одноэлементных множеств

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – число одноэлементных нечетких множеств, характеризующих единственное значение выходной лингвистической переменной  $y$ .

– Центр площади

Четкое значение  $y$  определяется как абсцисса  $d$  центра площади под интегралом, задающим множество выходной переменной  $Y$  после композиции,  $d$  является биссектрисой площади, и определяется из (3.7)

$$\int_{i=\min}^d \mu(y_i) dy_i = \int_{i=d}^{\max} \mu(y_i) dy_i \quad (3.7)$$

Метод центра площади не используется для одноточечных множеств.

– Левое модальное значения

$$y = \min(y_m), \quad (3.8)$$

где  $y_m$  – мода нечеткого множества выходной переменной  $Y$  после композиции.

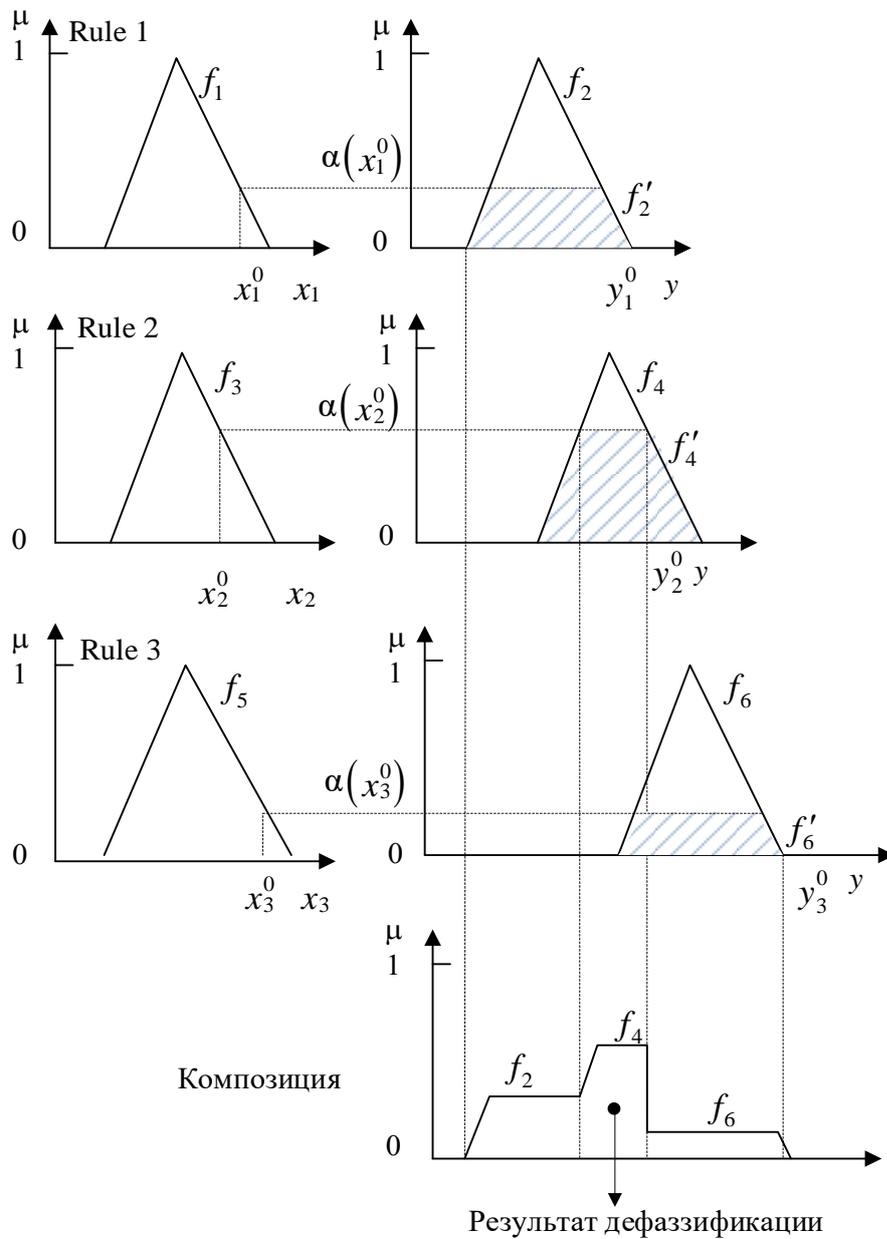


Рисунок 3.20 – Получение результата контроллером нечеткого вывода

– Правое модальное значение

$$y = \max(y_m), \quad (3.9)$$

На рисунке 3.20 иллюстрируется процесс получения результата контроллера нечеткого вывода.

### 3.3.2. Алгоритмы нечеткого вывода

Рассмотрим основные существующие алгоритмы нечеткого вывода на примере трех правил, используем обозначения на рисунке 3.20.

#### **Алгоритм Мамдани (Mamdani)**

Шаг 1. Синтез логической модели контроллера нечеткой логики согласно (3.4): получаем Rule 1, Rule 2, Rule 3.

Шаг 2. Фаззификация входных переменных согласно (3.3): получаем  $f_1, f_3, f_5$ .

Шаг 3. Определение для каждого правила значения истинности  $\alpha$ . Правила, для которых  $\alpha \neq 0$  являются активными. Используется операция МИНИУМ:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha(x_1^0) = f_1(x_1^0) \wedge f_2(y_1^0); \\ \alpha_2 &= \alpha(x_2^0) = f_3(x_2^0) \wedge f_4(y_2^0); \\ \alpha_3 &= \alpha(x_3^0) = f_5(x_3^0) \wedge f_6(y_3^0), \end{aligned} \quad (3.10)$$

где  $\wedge$  – операция логического МИНИМУМа.

Шаг 4. Определение усеченных функций принадлежности

$$\begin{aligned} f_2' &= \alpha_1 \wedge f_2 \\ f_4' &= \alpha_2 \wedge f_4 \\ f_6' &= \alpha_3 \wedge f_4 \end{aligned}$$

Шаг 5. Композиция заключений нечеткого вывода по операции МАКСИМУМ – получение итогового нечеткого множества

$$\mu_{\Sigma} = f'_2 \vee f'_4 \vee f'_6$$

Шаг 6. Дефаззификация выходной переменной по одной из формул определения центра тяжести (3.5), (3.6) или (3.7).

### **Алгоритм Цукамото (Tsukamoto)**

Применяется, когда функции принадлежности выходной переменной являются монотонными.

Шаги 1, 2 совпадают с предыдущим алгоритмом.

Шаг 3. Значения истинности определяются аналогично алгоритму Мамдани, после чего находятся четкие значения каждого правила из решения уравнений

$$\begin{cases} \alpha_1 = f_2(y_1^0) \\ \alpha_2 = f_4(y_2^0) \\ \alpha_3 = f_6(y_3^0) \end{cases}$$

Шаг 4. Композиция отсутствует.

Шаг 5. Дефаззификация выходных переменных центроидным методом, но для дискретного варианта

$$y = \frac{\alpha_1 y_1^0 + \alpha_2 y_2^0 + \alpha_3 y_3^0}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}.$$

### **Алгоритм Ларсена (Larsen)**

Шаги 1,2 совпадают с предыдущим алгоритмом.

Шаг 3. Определение для каждого правила значения истинности  $\alpha$  по (3.10).

Шаг 4. Определение частных нечетких подмножеств  $\alpha_1 f_2(y_1^0)$ ,  $\alpha_2 f_4(y_2^0)$ ,  $\alpha_3 f_6(y_3^0)$ .

Шаг 5. Композиция: определение итогового подмножества. Используется операция СУММА

$$\mu_{\Sigma} = \alpha_1 f_2(y_1^0) \vee \alpha_2 f_4(y_2^0) \vee \alpha_3 f_6(y_3^0).$$

Шаг 6. Дефаззификация выходных переменных любым известным методом.

### Алгоритм Сугено (Sugeno)

Шаг 1. Формирование базы правил на основе нечетких продукций в виде

$$\text{Rule: If "x}_1 \text{ is } y_1 \text{ AND " x}_2 \text{ is } y_2 \text{ TO "y=w}_1 y_1 + w_2 y_2 \text{".} \quad (3.11)$$

где  $w_1, w_2$  – весовые коэффициенты

$y_1$  и  $y_2$  – это значения входных переменных до этапа фаззификации.

Шаг 2. Совпадает с предыдущими алгоритмами.

Шаг 3. Определение для каждого правила значения истинности  $\alpha$ . Правила, для которых  $\alpha \neq 0$  являются активными. Используется операция МИНИУМ.

Шаг 4. Вычисление по (3.11) значения выходной переменной  $y$  для каждого правила,.

Шаг 5. Дефаззификация выходных переменных, например, по (3.6) для однотоочечных множеств.

### 3.3.3. Расширение протокола AODV

Использование аппарата нечеткой логики позволяет предложить новый метод маршрутизации, расширяющий возможности протокола AODV, то есть

оценивать маршруты доставки данных сразу по нескольким важным характеристикам.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является поиск лучшего и резервных маршрутов в условиях динамической картины БСС – подвижности узлов и их состояния.

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  $p_1$ , обозначим как нечеткое множество  $z_1$ ;
- пропускная способность канала  $p_2$ , обозначим как нечеткое множество  $z_2$ ;
- уровень остаточной энергии  $p_3$ , обозначим как нечеткое множество  $z_3$ ;
- коэффициент загрузки сенсорного узла  $p_4$ , обозначим как нечеткое множество  $z_4$ ;
- состояние узла (активность/сон)  $h_1$ , обозначим как нечеткое множество  $z_5$ ;
- длина очереди на обслуживание в узле  $p_5$ , обозначим как нечеткое множество  $z_6$ ;
- число хопов от И-узла к А-узлу  $p_6$ , обозначим как нечеткое множество  $z_7$ .

Схема последовательного применения контроллера нечеткой логики для определения маршрута доставки данных приведена на рисунке 3.21, где  $m$  – число сенсорных узлов БСС,  $q$  – число характеристик узлов БСС,  $q=6$ .

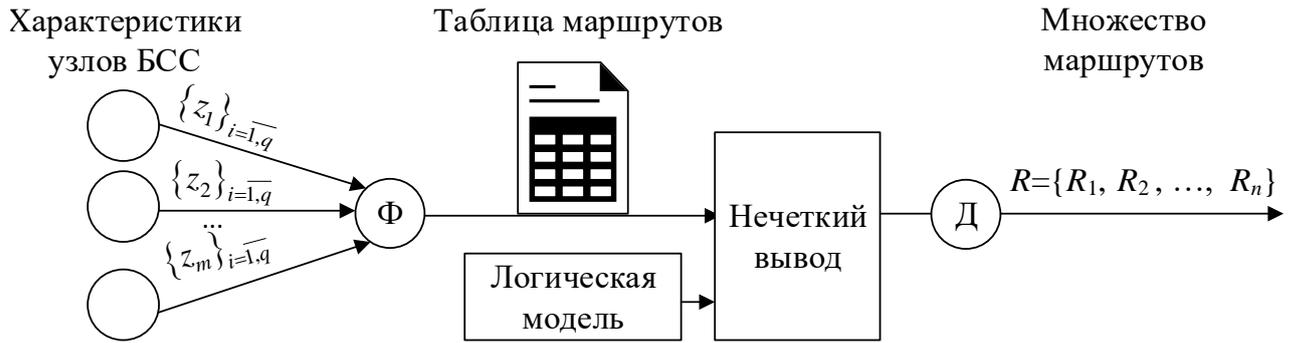


Рисунок 3.21 – Схема последовательного применения контроллера нечеткой логики для определения маршрута доставки данных

Выделим термы для каждого нечеткого множества входной характеристики, влияющей на выбор рационального маршрута доставки данных в БСС [51]:

$$z_1 = \{ \text{"малая"}, \text{"средняя"}, \text{"высокая"} \};$$

$$z_2 = \{ \text{"низкий"}, \text{"средний"}, \text{"высокий"} \};$$

$$z_3 = \{ \text{"низкая"}, \text{"средняя"}, \text{"высокая"} \};$$

$$z_4 = \{ \text{"низкий"}, \text{"средний"}, \text{"высокий"} \};$$

$$z_5 = \{ \text{"активный"}, \text{"сон"} \};$$

$$z_6 = \{ \text{"длинная"}, \text{"средняя"}, \text{"малая"}, \text{"отсутствует"} \};$$

$$z_7 = \{ \text{"большое"}, \text{"среднее"}, \text{"малое"} \};$$

Для преобразования множеств входных характеристик сенсорных узлов маршрутов в нечеткие множества введем конечное число функций принадлежности. Функции принадлежности входных характеристик приведены на рисунке 3.22.

Формирование функций принадлежности для фаззификации элементов множеств  $\{z_1\}_{i=1,q}$ ,  $\{z_2\}_{i=1,q}$ , ...,  $\{z_m\}_{i=1,q}$  позволяет осуществить переход к соответствующим нечетким множествам

$$\|\tilde{z}_{ij}\| = \mu(\|z_{ij}\|), \quad (3.12)$$

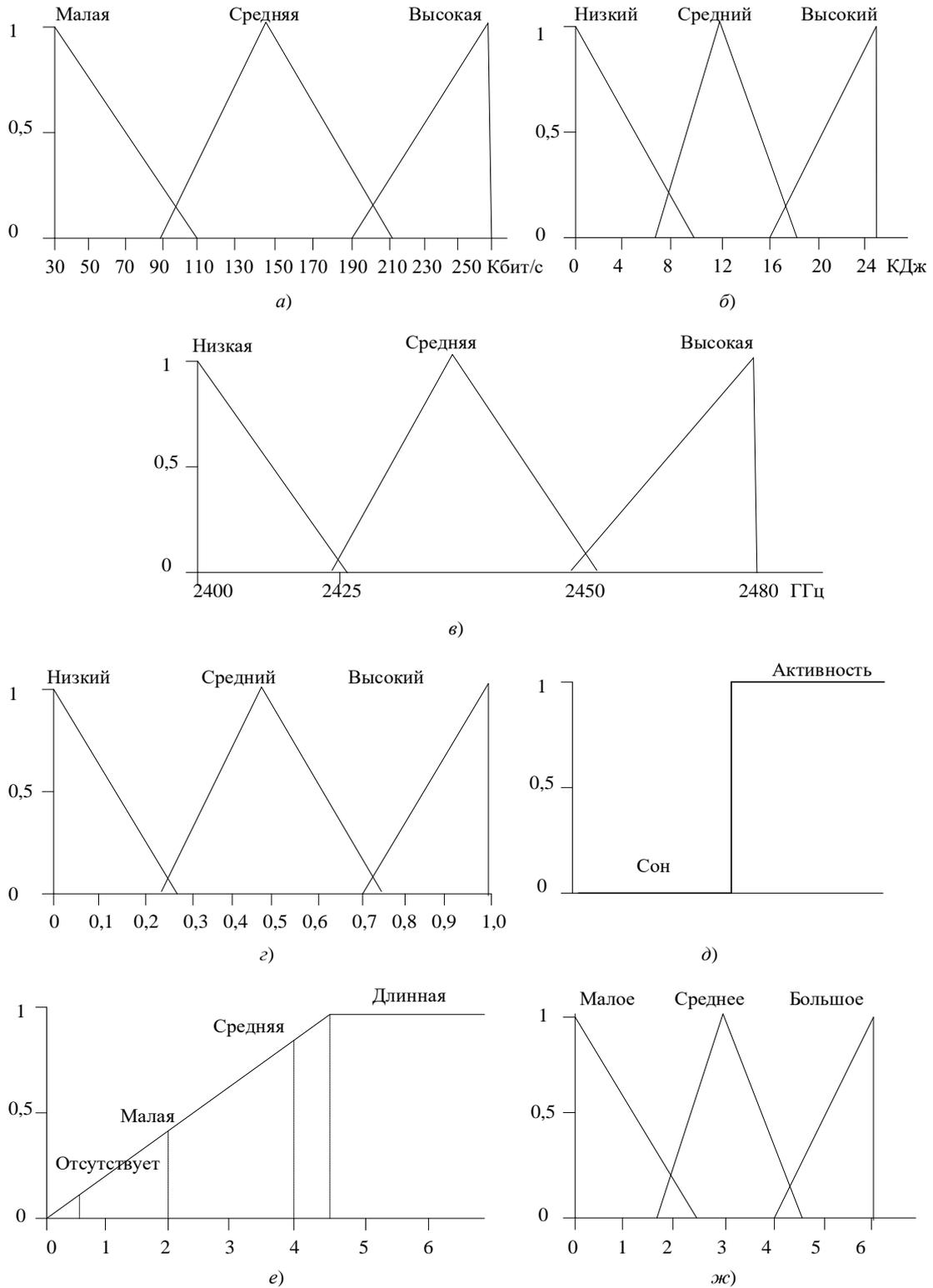


Рисунок 3.22 – Функции принадлежности входных характеристик маршрутов доставки: *а* – производительности сенсорного узла маршрута ( $\mu_1$ ); *б* – уровня остаточной энергии ( $\mu_3$ ); *в* – пропускной способности канала ( $\mu_2$ ); *г* – коэффициента загрузки сенсорного узла маршрута ( $\mu_4$ ); *д* – состояния сенсорного узла ( $\mu_5$ ); *е* – длины очереди к узлу на маршруте ( $\mu_6$ ); *ж* – числа хопов до А-узла ( $\mu_7$ )

где  $\tilde{z}_{ij}$  – нечеткие числа в интервале  $[0,1]$ , соответствующие оценкам  $i$ -й характеристике  $j$ -го узла.

Логическую модель зададим правилом Мамдани:

$$\mu_R(R) = \max_{k=1,n} \left\{ \min \left[ \mu_1(z_1)_k, \mu_2(z_2)_k, \mu_3(z_3)_k, \mu_4(z_4)_k, \mu_5(z_5)_k, \mu_6(z_6)_k, \mu_7(z_7)_k \right] \right\} \quad (3.13)$$

где  $n$  – количество правил логической модели,  $n=3^5+2^1+4^1=249$  – пять лингвистических переменных  $z_1, z_2, z_3, z_4$  и  $z_7$  имеют по три терма, одна лингвистическая переменная  $z_5$  имеет два терма, одна лингвистическая переменная  $z_7$  имеет четыре терма.

Нечеткий вывод каждого правила представляет собой лингвистическую переменную "рейтинг маршрута"  $R$ , множество значений которой состоит из пяти термов:  $R = \{\text{"очень высокий"}, \text{"высокий"}, \text{"средний"}, \text{"низкий"}, \text{"очень низкий"}\}$ .

Рейтинг маршрута вычисляется в результате дефаззификации выходного нечеткого множества методом центраида (3.5).

Для БСС из 15 узлов, приведенной на рисунке 3.7. Пусть узел 1 ищет оптимальный маршрут доставки данных узлу 14. Согласно протоколу по требованию AODV запускается процедура поиска возможных маршрутов от И-узла к А-узлу и контроллера нечеткой логики на узле 1 или центральном узле, который отправляет найденный оптимальный маршрут узлу 1.

В результате работы алгоритма маршрутизации будут найдены:

- семь возможных маршрутов через первый канал ко второму узлу (первый приоритет);
- четыре возможных маршрута через четвертый канал к третьему узлу (четвертый приоритет);
- семь возможных маршрутов через пятый канал к пятому узлу (пятый приоритет).

Пусть собранная статистика по узлам БСС соответствует данным таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты сбора данных о характеристиках узлов БСС

Номер узла	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$
1	0,9	0,87	1	0,92	1	0,56	0,97
2	0,67	0,75	0,8	0,82	1	0,89	0,88
3	0,78	0,64	0,7	0,81	1	0,76	0,69
4	0,91	0,87	0,9	0,92	1	0,86	0,97
5	0,88	0,77	0,6	0,79	1	0,81	0,64
6	0,93	0,85	0,4	0,91	0	0,52	0,95
7	0,77	0,55	0,2	0,74	1	0,52	0,78
8	0,88	0,86	1	0,96	0	0,62	0,70
9	0,99	0,95	0,8	0,82	1	0,69	0,81
10	0,63	0,47	0,4	0,76	1	0,73	0,87
11	0,87	0,65	0,5	0,42	1	0,76	0,65
12	0,91	0,71	1	0,92	0	0,89	0,91
13	0,77	0,72	0,7	0,59	1	0,45	0,2
14	0,89	0,87	1	0,92	1	0,61	0,87
15	0,74	0,75	0,8	0,78	0	0,69	0,83

Результаты нечеткого вывода для всех найденных маршрутов приведены в таблицах 3.3 - 3.5.

Таблица 3.3 – Результаты фаззификации по первому приоритету 6,76

Маршрут	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	Центроид	Рейтинг маршрута
1-2-8-9-14	0,67	0,75	0,8	0,82	0	0,56	0,70	0,636	Не используется
1-2-8-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	0	0,52	0,77	0,587	Не используется
1-2-8-4-9-14	0,67	0,75	0,8	0,82	0	0,56	0,70	0,636	Не используется

1-2-5-8-9-14	0,67	0,75	0,5	0,79	0	0,56	0,64	0,578	Не используется
1-2-5-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	1	0,52	0,64	0,621	Высокий
1-2-4-8-9-14	0,67	0,75	0,8	0,82	0	0,56	0,70	0,639	Не используется
1-2-4-9-14	0,67	0,75	0,8	0,82	1	0,56	0,81	0,801	Очень высокий

Таблица 3.4 – Результаты фаззификации по четвертому приоритету

Маршрут	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	Центроид	Рейтинг маршрута
1-3-5-8-9-14	0,78	0,64	0,6	0,79	0	0,56	0,64	0,591	Не используется
1-3-5-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	1	0,52	0,64	0,621	Высокий
1-3-6-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	0	0,52	0,69	0,621	Не используется
1-3-6-11-10-14	0,63	0,47	0,4	0,42	0	0,52	0,65	0,457	Не используется

Таблица 3.5 – Результаты фаззификации по пятому приоритету

Маршрут	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	Центроид	Рейтинг маршрута
1-5-8-9-14	0,88	0,77	0,6	0,79	0	0,56	0,64	0,627	Не используется
1-5-8-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	0	0,52	0,64	0,473	Не используется
1-5-8-4-9-14	0,88	0,77	0,6	0,79	0	0,56	0,64	0,627	Не используется
1-5-2-8-9-14	0,67	0,75	0,6	0,79	0	0,56	0,64	0,593	Не используется
1-5-2-4-9-14	0,67	0,75	0,6	0,79	1	0,56	0,64	0,741	Высокий
1-5-7-8-9-14	0,77	0,55	0,2	0,74	0	0,52	0,64	0,506	Не используется
1-5-7-10-14	0,63	0,47	0,2	0,74	1	0,52	0,64	0,621	Высокий

Все показатели узлов маршрута объединяются согласно алгоритму Мамдани. Таким образом, для маршрута «1-2-4-9-14» получаем значение центроида, равное 0,801, для маршрута «1-3-5-7-10-14» – 0,621 и т.д. для всех маршрутов, имеющих рейтинг. Из множества маршрутов выберем оптимальный:  $\text{MAX} (0,621; 0,801; 0,621; 0,741; 0,621) = 0,801$ . Согласно полученным результатам оптимальным маршрутом следует считать «1-2-4-9-14», по нему будет выполнена доставка данных. Кроме маршрута с «очень высоким» рейтингом также определены маршруты с «высоким» рейтингом – их можно считать резервными.

Очевидно, что со временем статистика маршрутов будет меняться в силу подвижности и состояния узлов, истощения энергии БСС. Поэтому работа контроллера должна выполняться периодически, например один раз за раунд.

#### Выводы по третьей главе

1. Показано, что в существующих алгоритмах маршрутизации БСС учитывается число хопов от узла источника до адресата, что определяет эффективность маршрута. Рассмотрены протокол по запросу маршрута AODV и протокол иерархической маршрутизации через центральный узел для одноранговых БСС. 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. Результаты исследования опубликованы в работах [41, 70]

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. Результат опубликован в работе [46]

3. Рассмотрена структура контроллера нечеткой логики и предложены функции принадлежности для каждой характеристики узла БСС в виде лингвистической переменной и ее термов, алгоритмы нечеткого вывода и методы дефаззификации. Результат опубликован в работе [46,51]

4. Приведены сценарии выбора маршрутов БСС при разных значениях характеристик узлов БСС, демонстрирующих работоспособность предложенного метода, основанного на аппарате нечеткой логики. Результаты исследования опубликованы в работах [49, 70]

5. 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. Результаты исследования опубликованы в работах [45]

## . ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ ДАННЫХ

### 4.1. Математическая модель оценки времени доставки

Известно, что любая стратегия маршрутизации основывается на построении таблиц маршрутизации, сохраняемых в сетевых узлах, позволяющих в зависимости от характеристик узлов, выстраивать путь доставки данных А-узлу. Таким образом создается множество альтернативных путей для каждой пары «И-узел-А-узел» [68].

В третьей главе предложено при формировании таблицы маршрутизации на каждом Т-узле, записывать не только адрес узла и число Т-узлов до адресата, но и уровень заряда аккумулятора, производительность узла, наличие очереди, состояние узла и его загрузка.

Получаемая от узлов БСС статистика требует оценки и принятия решения о выборе оптимального маршрута доставки данных и проверяется имитационным моделированием. Как правило, в роли такого инструмента проверки применяется имитационная модель установления сквозного соединения по оптимальному маршруту для последующей передачи данных.

Установление сквозного соединения от И-узла к А-узлу, несмотря на подвижность узлов и их состояния (активность/сон), позволяет обеспечить гарантированную доставку данных.

Установление соединения начинается с отправки пакета ROUTE REQUEST, при получении которого на каждом узле запускается работа контроллера нечеткой логики и формируется множество альтернативных маршрутов доставки данных (рисунок 4.1).

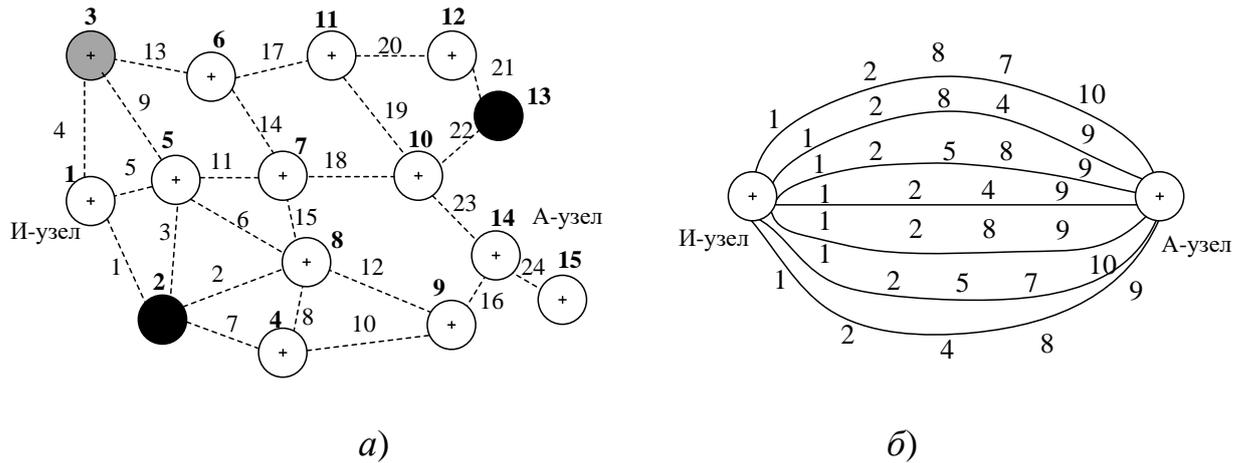


Рисунок 4.1 – Формирование маршрутов доставки данных: *а* – БСС;  
*б* – множество альтернативных маршрутов между И-узлом и А-узлом

Если любой Т-узел на маршруте находится в состоянии сна, переместился или занят обработкой собственных данных или произошла коллизия, то вызов через такой Т-узел не проходит и должен быть передан по альтернативному маршруту – выполняется рестарт к предшествующему узлу, либо к И-узлу для повторной посылки. Эта особенность должна быть отражена в модели.

Таким образом, конечный результат установления сквозного соединения имеет два исхода:

2) вызов дойдет до А-узла, будут зарезервированы ресурсы Т-узлов. По этому маршруту передается пакет данных. Время доставки оценивается по (1.1).

3) вызов не дойдет до А-узла (во всем множестве  $R$  альтернативных маршрутов наличествуют полностью занятые нагрузкой транзиты).

Время доставки данных в БСС с ячеистой топологией будем оценивать по (1.1) и (1.2).

Таким образом, входными данными для задачи оценки времени доставки данных являются:

- структурная модель БСС;
- производительность узлов БСС;
- пропускная способность каналов БСС;

- длина пакета;
- множество кратчайших путей;
- время истечения тайм-аута;
- допустимое число прытков установления доступа к соседним узлам;

БСС представляется в виде графа (рисунок 4.1, а).

На построенном множестве маршрутов  $R$  методом Монте-Карло разыгрываются значения характеристик узлов маршрута. Эти характеристики разыгрываются один раз перед началом эксперимента. По факту установления соединения между И-узлом и А-узлом фиксируются значения  $n_{att}$  и  $t_{out}$  и основанное на них значение времени построения маршрута  $t_m$  из (1.2). Далее, поскольку все остальные составляющие выражения (1.1) – времени доставки данных  $T$  являются детерминированными, то их оценка сводится к простым вычислениям:

$$t_i^{обп} = \sum_{i=1}^n \frac{L}{S_i}, \quad (4.1)$$

$$t_i^{неп} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{L}{\Lambda_i}, \quad (4.2)$$

где  $L$  – длина пакета, [бит];

$S_i$  – производительность  $i$ -го узла маршрута, [пакетов/с];

$n$  – число узлов в маршруте;

$\Lambda_i$  – пропускная способность  $i$ -го канала, [пакетов/с].

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

$$E^- = E^+ - (E'L + E''Ld^2),$$

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/м<sup>2</sup>;

$d$  – расстояние до соседнего узла маршрута.

Для получения устойчивых результатов оценки  $T$  эксперимент повторяется несколько раз при заданной топологии.

Поскольку на каждом узле работает контроллер нечеткой логики, то после каждой отправки пакета рейтинги маршрутов будут меняться. Таким образом, с течением времени БСС станет не работоспособной из-за потери энергии. Это дает основание сравнить время «жизни» БСС при реализации маршрутизации только по числу хопов и по предложенному алгоритму.

Имитационная модель построения маршрута является средством для оценки времени доставки данных на БСС с ячеистой топологией на этапе проектирования (развертывании) БСС при соблюдении реальных свойств ее узлов: смены состояний узлов («активный» или «сон») и вероятности возникновения коллизий.

#### 4.2. Особенности генерации некоторых исходных данных имитационной модели

Рассмотрим алгоритмы разыгрывания простого случайного события, согласно которому реализуется исходное состояние узла «активный» или «сон» и моделирование группы несовместных случайных событий, согласно которому реализуются исходы всех остальных характеристик узлов [59].

Обозначим случайное событие «состояние узла» как  $A$ . Основной характеристикой любого случайного события  $A$  является вероятность его появления –  $P(A)$ . Процедура моделирования простого случайного события  $A$  состоит из:

- формирования значения базовой случайной величины  $z_i$ ,  $i = \overline{1, K}$ , где  $K$  – число случайных чисел;
- сравнения  $z_i$  с заданной вероятностью  $P(A)$  появления события  $A$ . Если условие  $z_i < P(A)$  выполняется, то исходом моделирования является событие  $A$  – состояние «активный». В противном случае – противоположное событие  $\bar{A} \cdot P(\bar{A}) = (1 - P(A))$  – состояние «сон».

Алгоритм моделирования простого случайного события имеет вид, приведенный на рисунке 4.2.

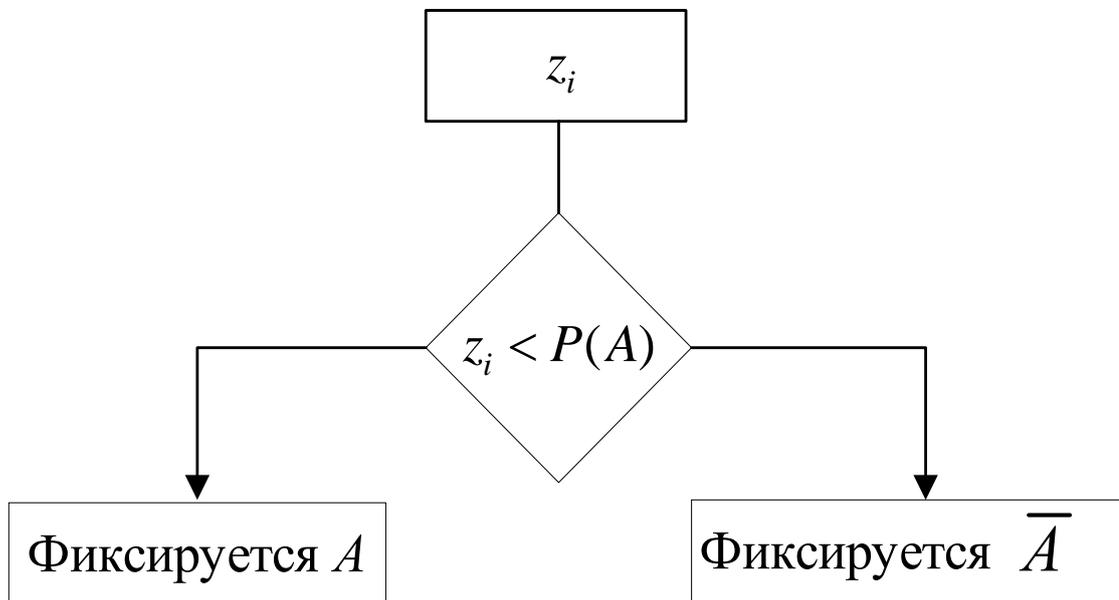


Рисунок 4.2 – Алгоритм моделирования простого случайного события

Состояние множества маршрутов  $R$  после применения моделирования простого случайного события ко всем узлам БСС получаем некоторое число непроводящих Т-узлов. В результате векторы  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , получают конкретную комбинацию из  $l$  единиц и  $(n-l)$  нулей. С учетом условий построения маршрута вычисляем значение  $\xi(n|l)_k = f[R_{ij}^k]$ , где  $\xi(n|l)_k$  – исход наличия или отсутствия маршрута при  $k$ -м испытании ( $k$ -й реализации  $R$ );  $\xi(n|l)_k \in (0,1)$ .

Значение  $\xi(x|\eta)_k=0$  означает, что маршрут от И-узла до А-узла не построен: все маршруты множества  $R$  содержат нули, либо число попыток разрешения коллизий превысило порогового значения.

Коэффициент загрузки  $\rho$  для каждого узла разыгрываем как дискретную случайную величину  $z$ , принимающей одно из значений 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1. Данный розыгрыш еще называют исходом испытания по жребию.

Таким образом, задано некоторое множество дискретных значений  $\rho_1, \dots, \rho_n$  с их вероятностями  $p_1, \dots, p_n$  соответственно ( $p_1 + \dots + p_n = 1$ ). Чтобы построить программную модель, «оживляющую» такую совокупность исходов, разбиваем интервал значений базовой случайной величины ( $0 \leq z \leq 1$ ) на  $n$  отрезков длиной  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Отрезки определяем следующим образом

$$\rho_1 = (0, p_1),$$

$$\rho_2 = (p_1, p_1 + p_2),$$

$$\rho_3 = (p_1 + p_2, p_1 + p_2 + p_3),$$

...

$$\rho_n = (p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1}, 1).$$

Алгоритм получения конкретного значения коэффициента загрузки  $\rho_j$  для  $j$ -го узла состоит в том, чтобы, обратившись к датчику базовой случайной величины, определить, в какой из интервалов  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  попало значение  $z$ . Факт его попадания в конкретный интервал  $\alpha_j$  определяет коэффициент загрузки узла  $\rho_j$ . Поскольку вероятность попадания  $z$  в интервал  $\rho_j$  равна его длине  $p_j$ , то и вероятность получения исхода  $\rho_j$  будет равна  $p_j$ .

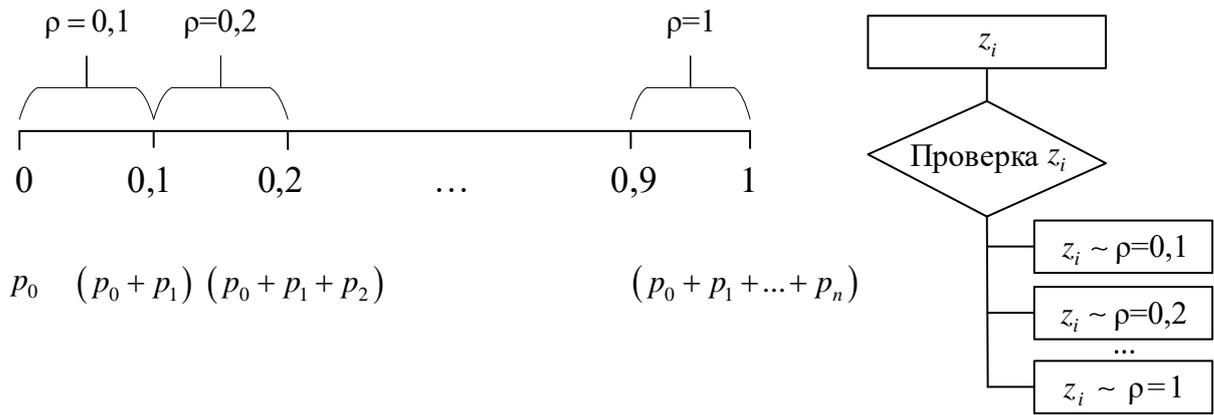


Рисунок 4.3 – Способ моделирования дискретной случайной величины

Длину очереди также разыгрываем как дискретную случайную величину методом «испытание по жребью» из диапазона, заданного функцией принадлежности:  $[0; 6]$ .

### 3.3. Описание имитационной модели построения маршрута и

Имитационная модель построения маршрута (рисунок 4.4) в самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети – это программная модель, позволяющая [42]:

во-первых, создать сеть с заданной топологией взаимодействия сетевых узлов, во-вторых, проводить имитационный эксперимент на беспроводной сенсорной сети с целью определения ВВХ доставки пакетов данных.

В редакторе структуры сети при нажатии на вкладку «Добавить» → «Добавить УК» в поле моделирования добавляется новый узел, при нажатии на вкладку «Добавить» → «Добавить КС» в поле моделирования добавляется канал связи (рисунок 4.5).

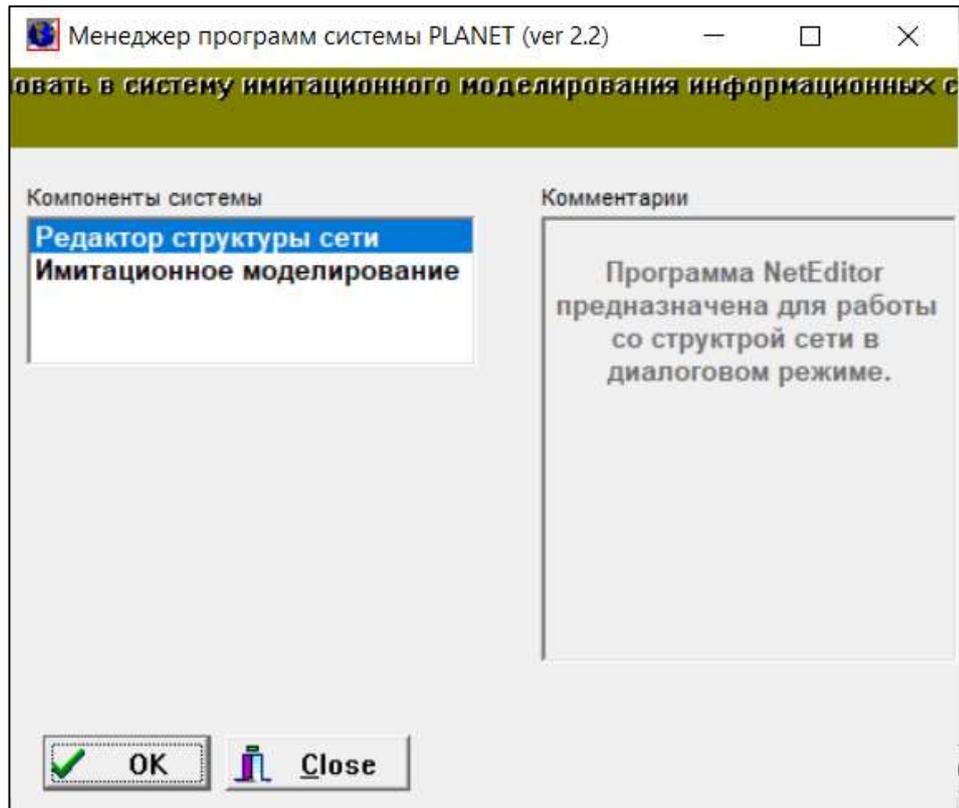


Рисунок 4.4 – Интерфейс программной реализации имитационной модели построения маршрутов доставки данных в самоорганизующейся БСС

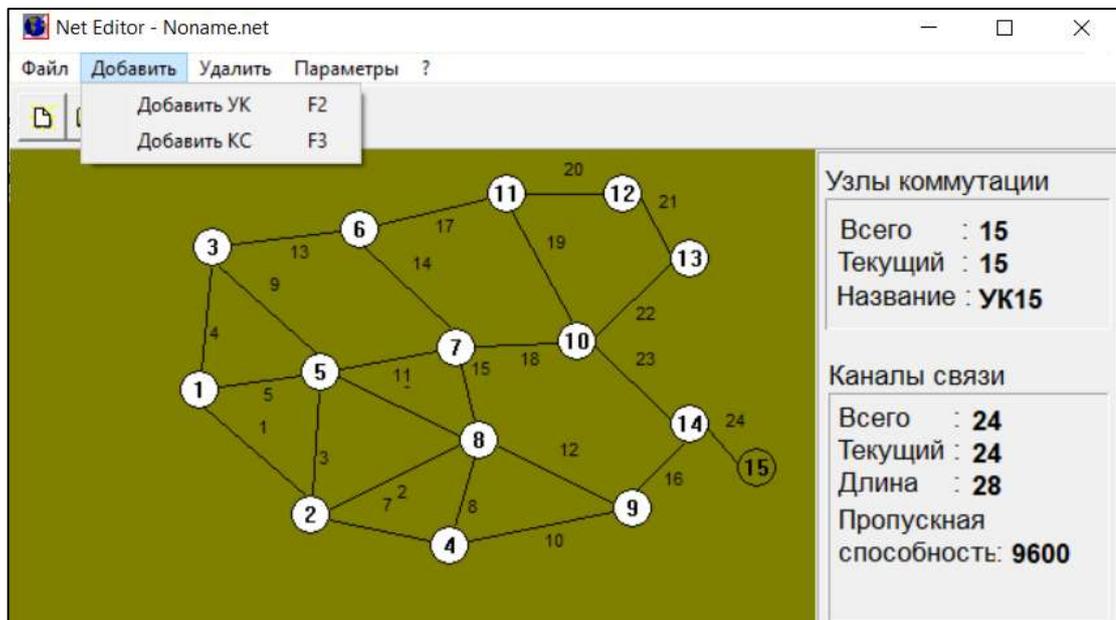


Рисунок 4.5 – Интерфейс редактора структуры сети (добавление узлов и каналов)

Во вкладке «Параметры» задаются параметры сетевого узла и канала соответственно. Для сетевого узла – это вероятность перехода в «спящий» режим (рисунок 4.6), для канала связи – это радиус действия сигнала, скорость передачи данных и вероятность разрыва соединения (рисунок 4.7). По умолчанию параметры имеют минимальное значение: вероятность перехода в «спящий» режим –  $10^{-3}$ ; радиус действия сигнала – 64 м; скорость передачи данных – 9,6 Кбит/с и вероятность разрыва соединения –  $5 \cdot 10^{-5}$ .

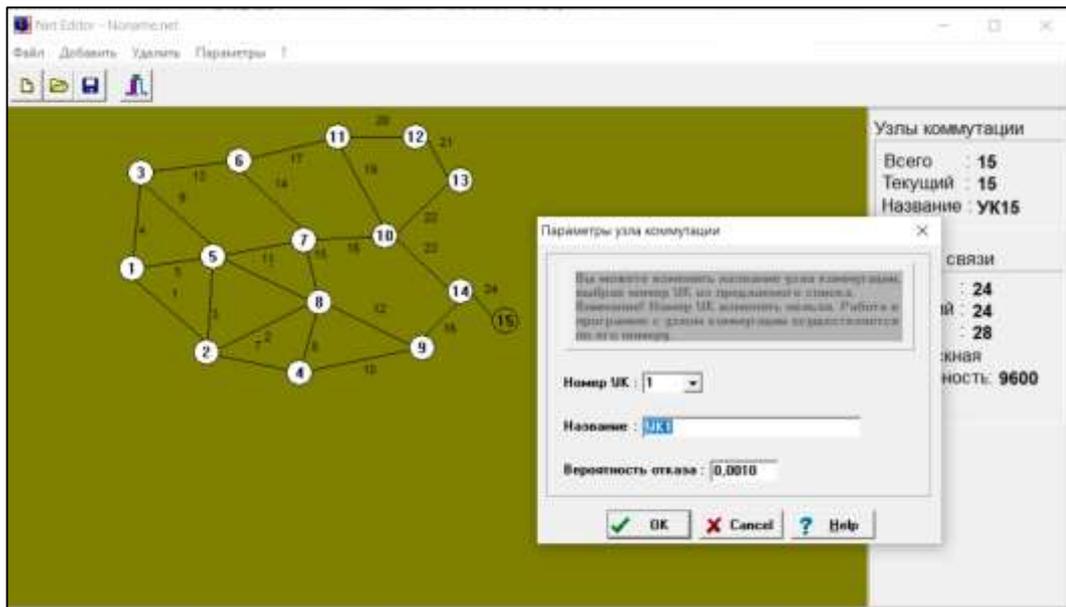


Рисунок 4.6 – Ввод параметров узла

Выполнение имитационного эксперимента на модели БСС заключается в том, что в каждой новой попытке установить соединение между выбранными узлами источника и адресата (на рисунке 4.8 – красным цветом) определяется число сетевых узлов и каналов связи, через которые не может быть установлено соединение. Это либо «спящие» узлы (на рисунке 4.9 – черные кружочки), либо разорванные связи (на рисунке 4.10 – пунктирной линией).

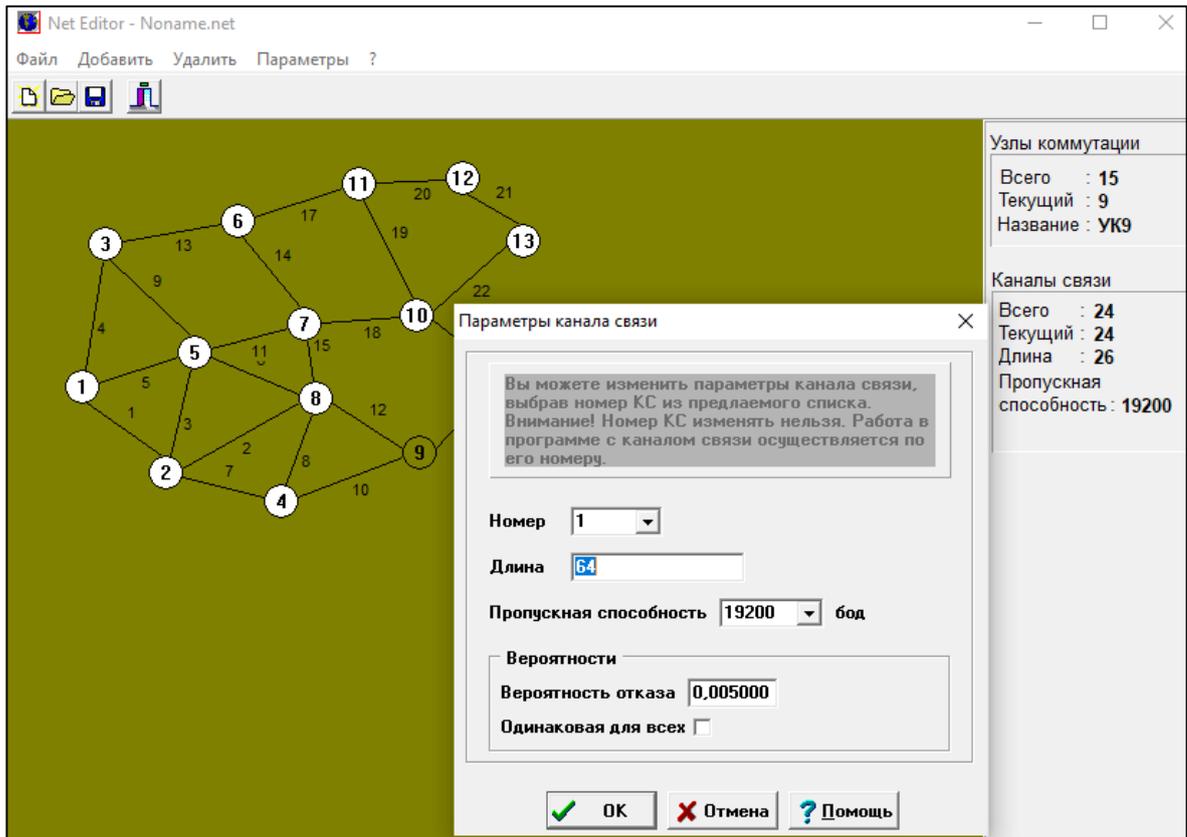


Рисунок 4.7 – Ввод параметров канала



Рисунок 4.8 – Окно визуализации эксперимента на модели

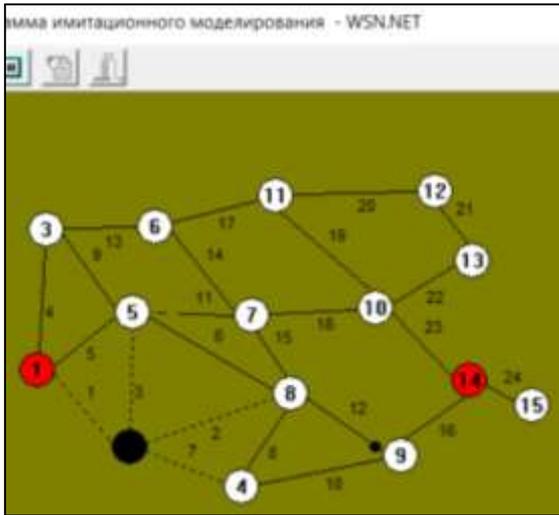


Рисунок 4.9 – Окно визуализации эксперимента на модели (спящие узлы – черные кружочки)



Рисунок 4.10 – Окно визуализации эксперимента на модели (непроводящие каналы – пунктирная линия)

При установленном сквозном соединении – маршрута доставки фиксируется время  $t_M$  и к нему добавляется время доставки самих данных, вычисляемое по (4.1) и (4.2).

По окончании эксперимента в окне «Статистика» публикуются результаты имитационного моделирования – вероятностно-временные характеристики установления соединения в самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети (рисунок 4.11).

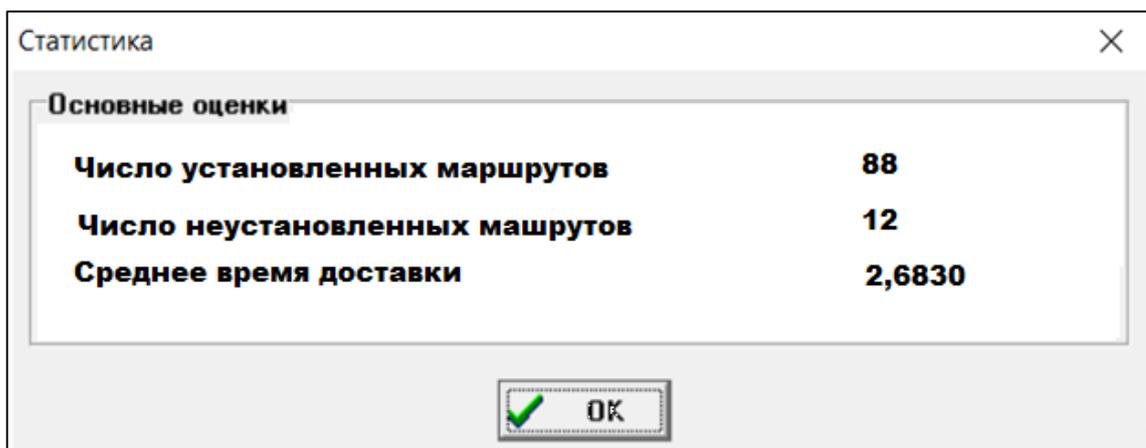


Рисунок 4.11 – Окно визуализации результатов эксперимента

На рисунке 4.12 приведено окно смены приоритета отправки.

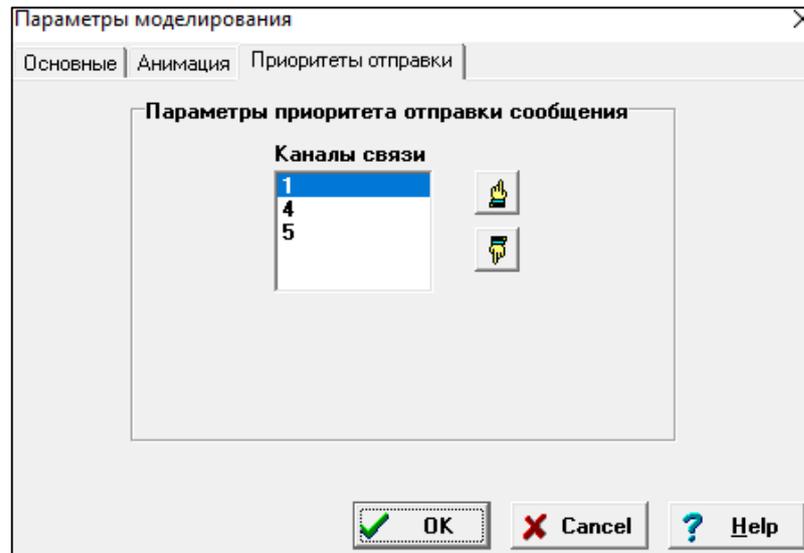


Рисунок 4.12 – Окно для смены приоритета отправки

По умолчанию стоит приоритет, заданный исходящим каналом с наименьшим номером. Для узла 1 рассматриваемой в эксперименте БСС таких приоритетов будет: 1,4 и 5. Для каждого приоритета эксперимент проводится отдельно и решение о выборе приоритета решается по результатам вероятностно-временных характеристик.

#### 4.4. Постановка задачи эксперимента по оценке времени доставки данных

Задачу имитационного эксперимента по оценке времени доставки данных в БСС сформулируем следующим образом:

1) Построить топологическую структуру БСС для проведения имитационного эксперимента на ней. Задать параметры, характеризующие узлы и каналы.

2) Построить зависимости, характеризующие время доставки данных в БСС при условии разного состояния узлов и вероятности коллизий.

Заданы следующие параметры, характеризующие УК и КС:

- Вероятность перехода узла в спящий режим – 0,01;
- Пропускная способность канала – 9,6 Кбит/с
- Вероятность перемещения узла –  $5 \cdot 10^{-3}$
- Число попыток разрешения коллизий – задается
- Время тайм-аута – 0,7 мс
- Количество экспериментов – 100

Построим зависимости  $T$  от:

– количества недоступных каналов  $n_a$  (узел вышел из сети или переместился), рисунок 4.13;

– количества попыток установления соединения  $n_{att}$  с соседним узлом, рисунок 4.14.

– серии эксперимента (каждая серия включает 100 экспериментов), рисунок 4.15.

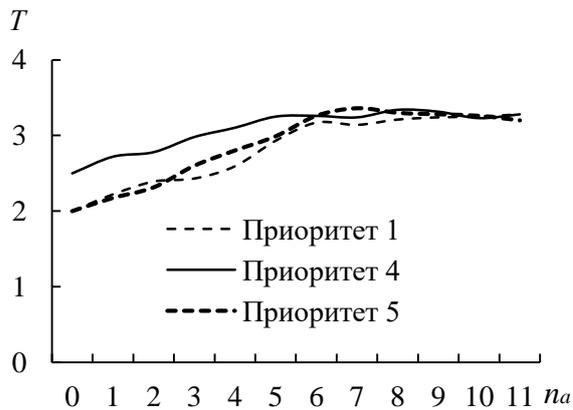


Рисунок 4.13 – Зависимость  $T$  от  $n_a$

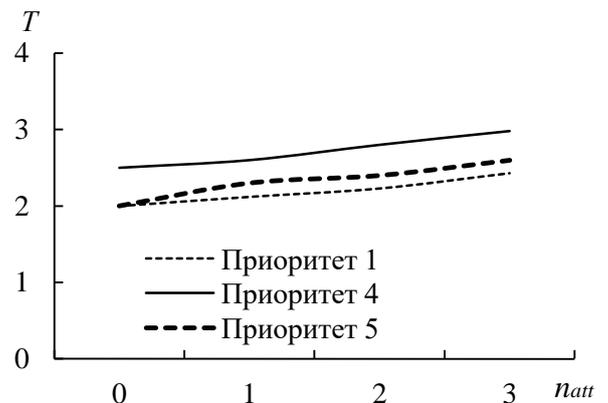


Рисунок 4.14 – Зависимость  $T$  от  $n_{att}$

С увеличением количества недоступных каналов увеличивается время доставки данных из-за необходимости поиска альтернативных путей доставки. Так, время доставки по приоритету 1 при доступности всех каналов на пути от И-узла (узел 1) к А-узлу (узел 14) составит 2 мс, и при увеличении недоступных каналов по всей БСС до 10-ти увеличивается до 3,23 с. Аналогичные выводы можно сделать и о времени доставки по приоритетам 4 и 5. При приближении числа недоступных каналов к 50% от общего числа каналов на всей БСС время доставки данных сходится к одному значению – возможности по поиску альтернативных маршрутов

сужаются. Так, при 11 недоступных каналах из 24-х каналов на заданной топологии БСС (рисунок 4.4) сходятся в одну точку – 3,25 мс (рисунок 4.13). Также видно, что для разных приоритетов отправки пакетов время доставки разное, что создает альтернативу выбора маршрута.

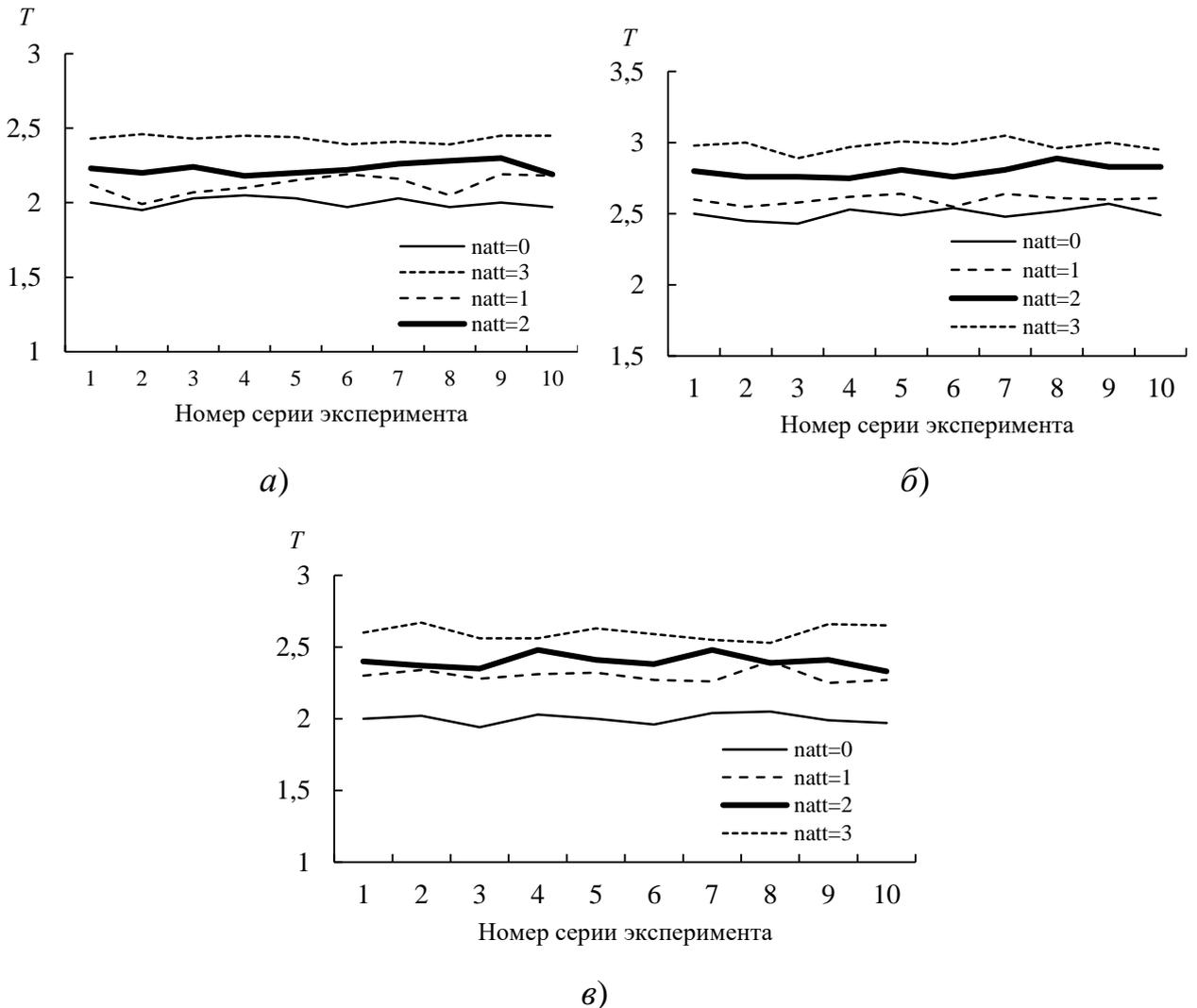


Рисунок 4.15 – Зависимость  $T$  от серии эксперимента: *а* – для приоритета 1; *б* – для приоритета 2; *в* – для приоритета 3

Количество попыток разрешения коллизий также влияет на время доставки данных (рисунки 4.14) – время увеличивается, но более одной попытки разрешения коллизий, по сути, увеличивает вероятность доставки данных.

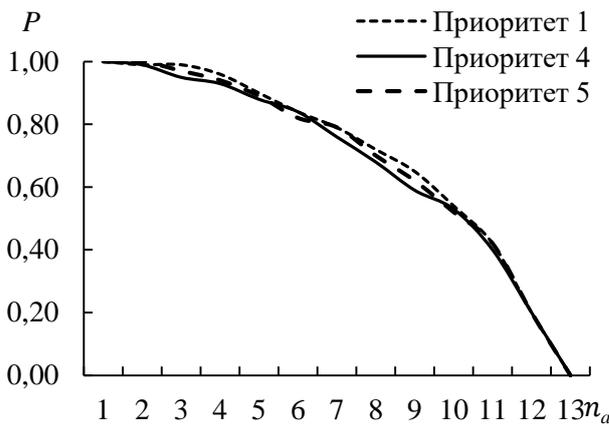
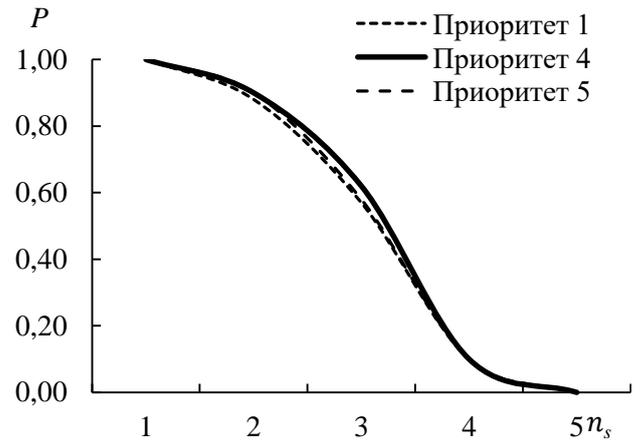
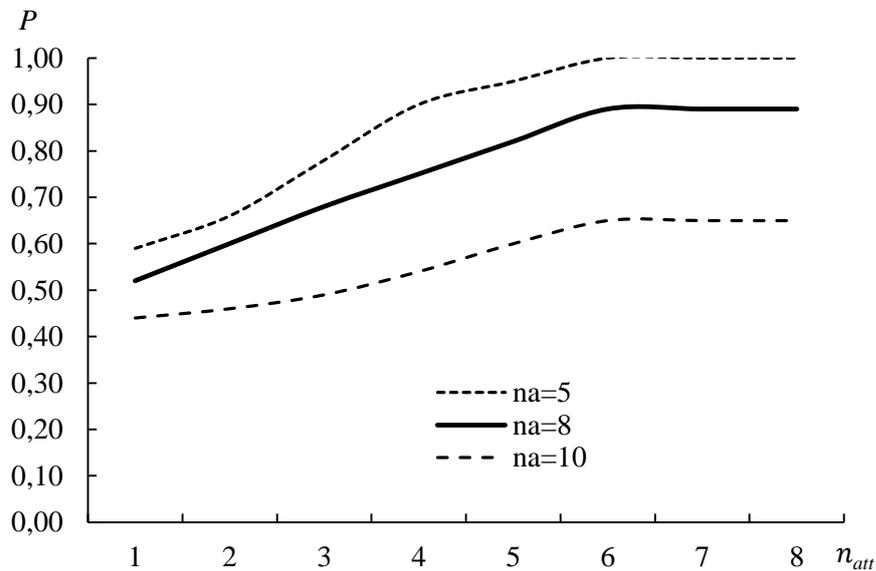
Графики на рисунке 4.15 показывают значения измеренного времени доставки данных в каждой серии эксперимента, дисперсия не превышает  $1,4 \cdot 10^{-3}$ .

Построим зависимости вероятности доставки данных  $P$  при  $n_{att} = 3$  от:

- количества недоступных каналов  $n_a$ , рисунок 4.16.
- количества «спящих» узлов  $n_s$ , рисунок 4.17.
- количества попыток установления соединения  $n_{att}$  с соседним узлом, рисунок 4.18

Вероятность доставки данных будет снижаться с увеличением количества недоступных каналов и «спящих» узлов. С увеличением количества недоступных каналов к 50% от общего количества каналов БСС вероятность доставки данных быстро падает до нуля (рисунок 4.16). При числе «спящих» узлов более 3-х БСС быстро теряет функцию доставки данных, так что вероятность построения маршрута сходится к нулю (рисунок 4.17). Вероятность доставки данных также увеличивается с ростом числа попыток установления соединения с соседним узлом, но до определенного значения – с большим числом недоступных каналов, например 10, увеличение числа попыток установления соединения с соседними узлами уже не влияет на вероятность доставки данных (рисунок 4.18). Этот эксперимент 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.

В имитационной модели предусмотрен эксперимент при заданном требуемом времени доставки данных  $T_{доп}$ , что позволяет рекомендовать значение  $T_{доп}$  для конкретной БСС. На рисунке 4.19 приведены зависимости количества построенных маршрутов  $N_R$  от  $T_{доп}$ , при этом зафиксируем  $n_{att} = 3$ ,  $n_a = 3$  для отправки данных по приоритету 1 (рисунок 4.19).

Рисунок 4.16 – Зависимость  $P$  от  $n_a$ Рисунок 4.17 – Зависимость  $P$  от  $n_s$ Рисунок 4.18 – Зависимость  $P$  от  $n_{att}$ 

По результатам на рисунке 4.19 можно сделать вывод о том, что  $T_{доп}$  влияет на вероятность доставки данных А-узлу, но есть его предельное значение, при котором вероятность доставки перестает увеличиваться. На рисунке 4.19 число построенных маршрутов фактически оценивает вероятность доставки данных, в % за допустимое время. Таким образом, если характеристика доставки данных имеет ограничение для определенного трафика, то эксперимент на конкретной структуре БСС позволяет оценить гарантированное время доставки.

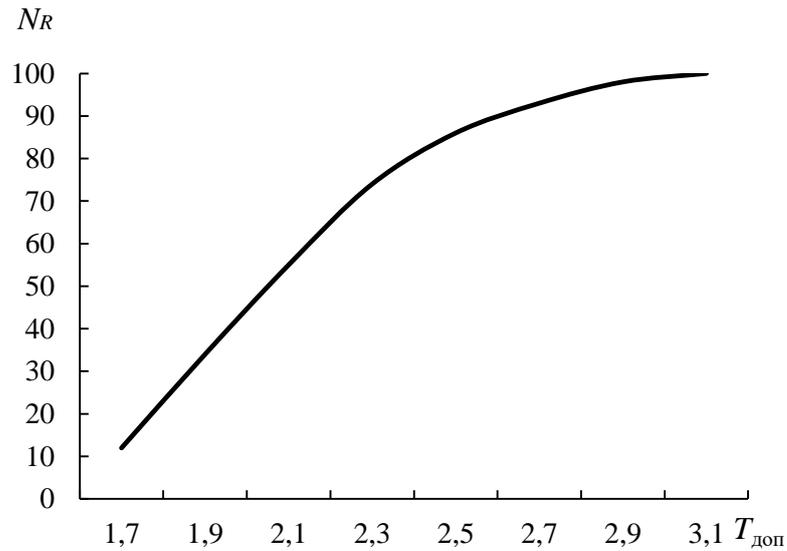


Рисунок 4.19 – Зависимость числа построенных маршрутов от  $T_{доп}$

На рисунке 4.20 приведены зависимости вероятностей  $P(T \geq T_{доп})$  и  $P(T < T_{доп})$  построения маршрута доставки данных от числа недоступных каналов. Очевидно, что для трафика реального времени  $T_{доп}$  имеет существенное значение. Но для трафика мониторинга (данных измерений)  $T_{доп}$  имеет второстепенное значение. Графики на рисунке 4.20 показывают вероятность построения маршрута, в том числе за границей  $T_{доп}$ .

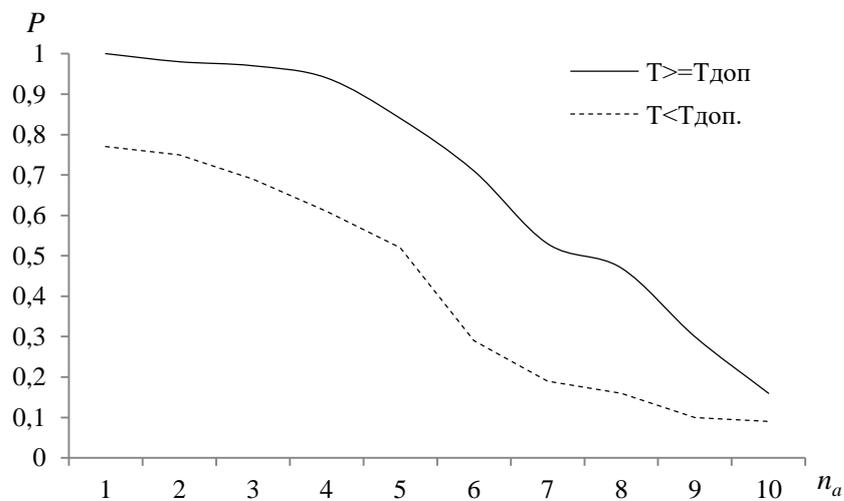


Рисунок 4.20 – График зависимости вероятностей построения маршрута доставки данных от числа недоступных каналов

На рисунке 4.21 приведена динамика потери узлов БСС при истощении энергии узлов.

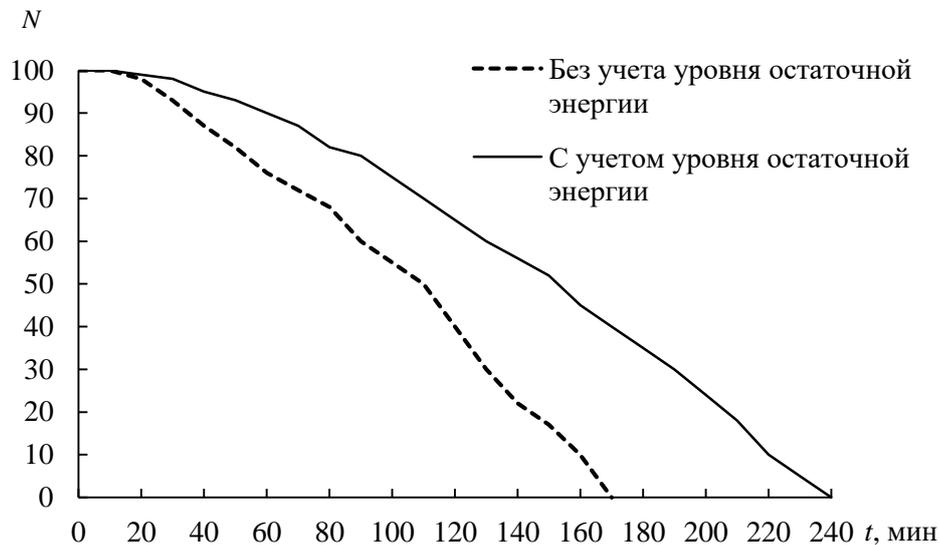


Рисунок 4.21 – Динамика числа узлов в жизненном цикле БСС

Если не учитывать уровень остаточной энергии узлов при выборе маршрута доставки данных, а выбирать кратчайшие маршруты только по времени доставки данных, как это реализуется в инфраструктурных сетях передачи данных, то время жизни БСС  $t$  будет сокращаться значительно быстрее в сравнении с этой же БСС, но в которой учитывается уровень остаточной энергии узлов при выборе маршрута доставки данных. Это связано с тем, что при каждой отправке от И-узла к А-узлу будет выбираться один и тот же маршрут, что быстро приведет к истощению энергии узлов маршрута и, соответственно, всей БСС, т.к. узлы маршрута являются транзитными узлами и других маршрутов. В данной топологии БСС учет уровня остаточной энергии узлов БСС позволяет увеличить  $t$  на один час.

## Выводы по четвертой главе

1. Предложена математическая модель определения ВВХ доставки данных в БСС с ячеистой топологией. Модель легла в основу имитационного моделирования построения маршрутов БСС.

2. 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.

3. Уровень остаточной энергии узла снижается после каждой ретрансляции пакета данных. Учет уровня остаточной энергии влияет на выбор маршрута.

4. Предложена система имитационного моделирования БСС, позволяющая на созданной структуре БСС оценить время доставки данных и вероятность потери данных с учетом особенностей функционирования БСС. Результаты имитационного моделирования опубликованы в работах [47]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная задача, поставленная 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 территории сплошным сенсорным полем 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 ВВХ доставки данных узлу-адресату.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алзагир А.А. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений / А.А. Алзагир, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 2-7.
2. Ачилова И.И., Глушак Е. В. Исследование беспроводных сенсорных сетей / И.И. Ачилова, Е.В. Глушак // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 5-1. – С. 11-17.
3. Баскаков С.С. Оценка энергопотребления беспроводных узлов в сетях MeshLogic / С.С. Баскаков // Беспроводные технологии. – 2010. – № 1. –С. 28-31.
4. Бершадский А.М. Обзор методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Бершадский, Л. С. Курилов, А. Г. Финогеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 47–57.
5. Бескид П.П. 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.
6. Богатырев В.А. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем / В.А. Богатырев, Н.С. Кармановский, Н.А. Попцова, С.А. Паршутина, Д.А. Воронина, С.В. Богатырев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. –Т. 16, № 5(105). – С. 831–838.
7. Боговик А.В. Современные сетевые технологии в телекоммуникационных системах / А.В. Боговик, Н.А. Зюзин, В.А. Керко под общ. ред. проф. А. А. Сикарева. – СПб: СПбГУВК, 2008. – 477 с.
8. Бойков К.Б. 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.

9. Боков С.И. О роли обеспечения системы управления цифровой экономикой России на основе организации единого информационного пространства / С.И. Боков // Нанондустрия. – 2019. – Т.12. – С. 135–139.

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

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

12. Варгаузин В.А. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / Варгаузин В.А. // ТелеМультиМедиа. – 2005. – № 6. – С. 23-27.

13. Варгаузин В.А. Сетевая технология ZigBee / В.А. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. – 2005. – С. 29-32.

14. Викулов, А.С. Анализ трафика в сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 21–27.

15. Вишневский В.В. Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G / В.В. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 471 с.

16. Вишневский В.В. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11s – технологии и реализация / В. Вишневский, Д. Лаконцев, А. Сафонов, С. Шпилев // Первая миля. – 2008. – № 2-3. – С. 26-31.

17. Восков Л.С. Web вещей – новый этап развития интернета вещей / Л.С. Восков, Н.А. Пилипенко // Качество. Инновации. Образование. – 2013. – № 2. – С. 44-49.

18. Галинина О.С. Анализ кооперации M2M устройств в сотовых сетях

связи / О.С. Галинина, А.В. Пяттаев, С.Д. Андреев, А.М. Тюрликов // В мире научных открытий. – 2013. – С. 271-296.

19. Гольдштейн Б.С. Инфокоммуникационные сети и системы / Б.С. Гольдштейн. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 208 с.

20. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.

21. Иванов А.В. Региональный экологический мониторинг эпохи интернета вещей / А.В. Иванов // Управление техносферой. – 2018. –Т. 1, вып. 2. – С. 165-184.

22. Иванов В.Э. Проблемно-ориентированные сенсорные сети: практический подход / В. Э. Иванов, А. В. Левенец, Чье Ен Ун; под ред. Чье Ен Уна. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 219 с.

23. Интернет вещей и межмашинные коммуникации. Обзор ситуации в России и мире // Мобильные телекоммуникации. 2013. – №7. – С. 26-28.

24. Киреев С.А. Оптимизация передачи информации в самоорганизующихся сетях. Процессы управления и устойчивость / С.А. Киреев. – 2020. – Том 7. – №1. – С. 381-386.

25. Киричек Р.В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Р.В. Киричек, А.И. Парамонов, А.В. Прокопьев, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2014. – № 4 (8). – С. 29-41.

26. Кашкаров Д.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Модель и метод использования множественных связей для реализации сверхнадежных соединений в сети 5G //Электросвязь. – 2021. – № 8. – С. 16-22.

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

28. Куроуз, Д. Компьютерные сети. Нисходящий подход / Д. Куроуз, К. Росс. – М.: Эксмо, 2016. – 912 с.

29. Кутузов О.И. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик: монография / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова. – СПб. ГУАП, 2015. – 382 с.

30. Кучерявый А.Е. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети / А.Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь. – 2009. - № 8. – С. 32 - 36

31. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Лелленков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.

32. Ли П. Архитектура интернета вещей/ пер. с англ. М.А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс – 2019. – 454 с.

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

34. 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.

35. 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.

36. Миклуш В.А. Использование системы управления движением судов в многосенсорных системах мониторинга морской поверхности / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова. В сборнике: Информационные системы и технологии в моделировании и управлении. Сборник трудов V

Международной научно-практической конференции. Отв. редактор К.А. Маковейчук. 2020. С. 195-199.

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

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. Миклуш В.А. Информационно-измерительная система дистанционного зондирования акватории порта / В.А. Миклуш // В книге: Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах

22. Сборник докладов Второй Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. – С. 325-329.

44. Миклуш В.А. Выбор и оптимизация расположения датчиков по критерию получения максимума информации // В.А. Миклуш, С.В. Миклуш // В книге: 'Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах' 23. Сборник докладов Третьей Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 109-115.

45. Миклуш В.А. Алгоритм маршрутизации самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей на базе контроллера нечеткой логики / В.А. Миклуш, С.В. Рудых, Т.М. Татарникова, // Морская радиоэлектроника. – 2023 – Т. 83, № 1. – С. 40-47

46. Миклуш В.А. Выбор маршрута доставки данных, основанный на применении математической теории нечетких множеств / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова // В книге: 'Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах' 23. Сборник докладов Третьей Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 116-125

47. 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

48. 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.

49. 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.

50. Миклуш В.А. Постановка задачи формирования множества альтернативных маршрутов mesh-сети / В.А. Миклуш // Успехи современной радиоэлектроники. – 2023 - т. 77, № 8, - С.5-10

51. 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

52. Михайлов В.В. Системы метеорологического, экологического и аэрокосмического мониторинга / В.В. Михайлов. – М.: Радиотехника, 2015. – 184 с.

53. Мулярчик К.С. Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях / К.С. Мулярчик, А.С. Полочанский // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. – 2017. – № 2. – С. 65–70.

54. Олифер В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Олифер, Н. олифер. – СПб.: Питер, 2016. – 992 с.

55. Осипов И.Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование / И.Е. Осипов // Технологии и средства связи. – 2006. – № 4. – С. 38–45.

56. Рагозин Д. В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей / Д.В. Рогозин // Проблемы программирования. – 2008. – № 2-3. Специальный выпуск. – С. 721-729.

57. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет вещей. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 200 с.

58. Росляков А.В. Будущие сети (Future networks) / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 274 с.

59. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технология /Ю.И. Рыжиков. – СПб: КОРОНА принт, 2015. – 380 с.

60. Саид М. А. С. Разработка алгоритма маршрутизации в MANET сетях / М.А.С. Саид // Труды учебных заведений связи. – 2011. – №184-185. – С.73-82.

61. Сашенко К.О. Применение беспилотных летательных аппаратов в предупреждении техногенных катастроф и мониторинге их последствий / К.О. Сашенко, В.А. Миклуш, Е.В. Краева. В книге: 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.

62. Татарникова Т.М. Методы увеличения жизненного цикла сети интернета вещей / Т.М. Татарникова, И.Н. Дзюбенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 843-849.

63. Татарникова Т.М. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей / Т.М. Татарникова, М.А. Елизаров // Информационно-управляющие системы. – 2017. – №2. – С. 44-50.

64. Татарникова Т.М. Алгоритм размещения датчиков системы экологического мониторинга / Т.М. Татарникова, П.Ю. Богданов, В.А. Миклуш В.А. // Телекоммуникации. – 2022. – № 3. – С. 2-9.

65. Татарникова Т.М. Комплексная система экологического мониторинга акватории морского порта / Т.М. Татарникова, В.А. Миклуш, П.Ю. Богданов // Информация и Космос. – 2022. – № 1. – С. 88-93.

66. Татарникова Т.М. Оценка показателей качества обслуживания беспроводных сенсорных сетей / Т.М. Татарникова, В.А. Миклуш, С.В. Рудых // Информация и Космос. – 2022. – №4. – С.21-27.

67. Федоров А. Е. Моделирование упреждающего и реагирующего протоколов маршрутизации в беспроводной мобильной адаптивной сети / А.Е. Федоров, К.Е. Легков // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2014. – №1. – С. 362-65

68. Шаваша Алаа. Методика динамической маршрутизации в беспроводных компьютерных сетях на основе архитектурно-целевого подхода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.15 2012. – М.: МЭСИ. – 22 с.

69. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 388 с.

70. Шнепс-Шнеппе М.А. Цифровая экономика: телекоммуникации – решающее звено / М.А. Шнепс-Шнеппе, Д.Е. Намиот. – М.: Горячая линия-Телеком, 2018. – 150 с.

71. Юркин В.Ю. Иерархические подходы к самоорганизации в беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетях на основе хаотических радиоимпульсов / В.Ю. Юркин, Т.И. Мохсени // Труды МФТИ. 2012. – Том 4, №3. – С. 151-161.

72. Akyildiz I. F. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks / I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, K.R. Chowdhury // Ad Hoc Networks. – 2009. Nom. 7(5). – P. 810 – 836.

73. Balen J. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents / J. Balen, D. Zagar, G. Martinovic // Recent Pat. Comput. Sci. – 2011. – Vol. 4, no. 3. – P. 188–202.

74. Basford P. J. Performance analysis of single board computer clusters / P. J. Basford, S. J. Johnston, C.S. Perkins, T. Garnock-Jones, F.P. Tso, D. Pezaros, S.J. Cox // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 102. – P. 278-291.

75. Boeing G. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction / G. Boeing // Systems. – 2016. – Vol. 4. P. 37-54.

76. Bogatyrev A.V. Analysis of the timeliness of redundant service in the system of the parallel-series connection of nodes with unlimited queues / A.V. Bogatyrev, S.V. Bogatyrev, V.A. Bogatyrev // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. – 2018. – P. 8604379.

77. Bonomi F. Fog computing and its role in the internet of things / F. Bonomi // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing, – 2012. – P. 13–16.

78. Dagaev A.V. Availability factor analysis of a network in mesh structure / A.V. Dagaev, V.D. Pham, R.V. Kirichek, O.V. Afanaseva, E.A. Yakovleva // В сборнике: Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2021). Материалы XXIV

Международной научной конференции. под общ. ред. В.М. Вишневого, К.Е. Самуилова. Москва, 2021. – С. 390-400.

79. Doo-Soon Park. Fault Tolerance and Energy Consumption Scheme of a Wireless Sensor Network / Doo-Soon Park // International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2013, Article ID 396850. 7 p.

80. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks / F. Dressler // Computer Communications. – 2008. – V. 31, N 13. – P. 3018-3029.

81. Dziubenko I. N. Algorithm for Solving Optimal Sensor Devices Placement Problem in Areas with Natural Obstacles / I.N. Dziubenko, T.M. Tatarnikova // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2018. – P. 1-4.

82. Goldstein B.S. Tasks of ensuring normalized QoS in next generation networks / B.S. Goldstein, N.A. Sokolov // В книге: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. 2018. С. 110-114.

83. Kraeva E. 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.

84. Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks / V. Krishnamurthy // Proc. IEEE ICASSP. – 2005. – V. 5. – P. 793-796.

85. Lysogor I.I. Energy efficient method of data transmission in heterogeneous network of the internet of things for remote areas / I.I. Lysogor, L.S. Voskov, A.Y. Rolich, S.G. Efremov // В сборнике: 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 - Proceedings. – 2019. – С. 8729647.

86. Lysogor I. Study of data transfer in a heterogeneous Lora-satellite network for the internet of remote things / I. Lysogor, L. Voskov, A. Rolich, S. Efremov // *Sensors*. – 2019. – Т. 19, № 15. – С. 3384.

87. 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.

88. Mills K.L. A brief survey of self-organization in wireless sensor networks / K.L. Mills // *Wireless Communications and Mobile Computing*. – 2007. – V. 7, no. 7. – P. 823–834.

89. Pham V.D. Evaluation of a mesh network based on Lora technology / V.D. Pham, V. Kisel, R. Kirichek, A. Koucheryavy, A. Shestakov // В сборнике: 2022 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICAICT). 24, Artificial Intelligence Technologies toward Cybersecurity. ICAICT 2022 - Proceedings" 2022. – С. 1280-1285.

90. Ran G. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic / G. Ran, H. Zhang, S. Gong // *Journal Inf. Comput. Sci.* – 2010. – No. 7. – P. 767–775.

91. RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>.

92. Roychowdhury S. Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing / S. Roychowdhury, C. Patra // *International Journal of Computer and Communication Technology (IJCCT)* for International Conference on Advances in Computer, Communication Technology and Applications (ACCTA-2010) (August 2010). – 2010. – V.1, № 2–4. – P. 309–313.

93. Tanenbaum A. *Computer Networks* / A. Tanenbaum, D. Wetherall. 5th ed. – Prentice Hall, 2010. – 960 p.

94. Tran T.X. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges / T.X. Tran, A. Hajisami, D. Pompili, P. Pandey // IEEE Communications Magazine. – 2017. – V. 55, no. 4. – P. 54-61.

95. Timochkina T.V. 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.

96. Wang C. CANS: Towards congestion-adaptive and small stretch emergency navigation with wireless sensor networks / C. Wang, H. Lin & H. Jiang // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2015. – V.15, no.5. – P. 1077-1089.

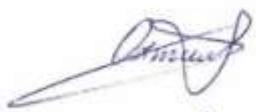
97. Xia F. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks / F. Xia // Sensors. – 2008. – Vol. 8, issue 2. – P. 1099-1110.

98. ZigBee Standards Overview/ ZigBee® Alliance. Режим доступа: <http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx>.

99. 802.15.4-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks // IEEE Standards Association. – 2011. Режим доступа: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2011.html>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Копии актов внедрения

<p style="text-align: center;">Государственная корпорация «РОСТЕХ» Акционерное общество <b>«Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий»</b> <b>«ПЕТРОКОМЕТА»</b></p> <p style="text-align: center;">Юридический адрес: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит.А Почтовый адрес ОПЕ: 194944, г. Санкт-Петербург, ул. Тобольская д. 12 Телефон: (812) 600-15-12, mail@petrokometa.ru</p>	<p style="text-align: center;"><b>УТВЕРЖДАЮ</b> Генеральный директор АО «НИО ЦИТ «Петрокомета» Доктор технических наук, профессор</p> <p style="text-align: right;">М. Ю. Охтилев 2023 г.</p> <p style="text-align: center;">М.П.</p> 
<p><b>АКТ</b> о внедрении научных результатов, полученных Миклуш Викторией Александровной</p>	
<p>Комиссия в составе:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Председатель – Коромысличенко Владислав Николаевич, кандидат технических наук, СНС, первый заместитель генерального директора;</li> <li>– Члены комиссии: Охтилев Павел Алексеевич, кандидат технических наук, директор департамента научно-исследовательских разработок;</li> <li>– Зяичурин Александр Эдуардович, начальник отдела предпроектных исследований;</li> </ul>	
<p>составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Миклуш Виктории Александровны, выполненной на тему «<b>Модели и алгоритмы обеспечения гарантированной доставки данных в самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией</b>» и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов разной физической природы на заданной территории;</li> <li>– Алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией –</li> </ul> <p>использованы в АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета» при выполнении СЧ ОКР на тему «Автоматизированная система управления подготовкой и пуском РКН на СК 373УТ74. Программное обеспечение контроля аппаратно-программных средств», Государственный контракт на тему «Создание космического ракетного комплекса тяжелого класса на космодроме «Восточный» от 24.04.2021 г. № 1525730303563217000241100/094-06/02-21 (Генеральный заказчик – Государственная корпорация по космической деятельности «РОСКОСМОС», Головной исполнитель – «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В.Хруничева») – при выполнении технического проектирования, разработки и испытаний комплексов программ контроля аппаратно-программных средств автоматизированной системы управления подготовкой и пуском РКН. Применение методов и алгоритмов оценки оперативности информационной системы позволило подобрать оптимальные параметры для обеспечения непрерывного функционирования системы при гарантированном уровне быстродействия.</p>	
<p><b>Председатель комиссии:</b> Первый заместитель генерального директора, кандидат технических наук, СНС</p>	 <p style="text-align: right;">В. Н. Коромысличенко</p>
<p><b>Члены комиссии:</b> Директор департамента научно-исследовательских разработок, кандидат технических наук</p>	 <p style="text-align: right;">П. А. Охтилев</p>
<p>Начальник отдела предпроектных исследований</p>	 <p style="text-align: right;">А. Э. Зяичурин</p>



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»  
(ГУАП)**

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000  
Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057  
E-mail: info@guap.ru; http://new.guap.ru  
ОКПО 0206@452; ОГРН 1027810232680  
ИНН/КПП 7812003110/783801001

19.04.2023 № 321-1657/23

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по образовательным  
технологиям и образовательной  
деятельности



(В.Ф. Шиндалков)

2023 г.

#### АКТ

о внедрении научных результатов,  
полученных Миклуш Викторией Александровной

Комиссия в составе:

- Мичурин Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Информационных систем и технологий;
- Фомин Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Информационных систем и технологий;
- Красильникова Ольга Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных систем и технологий.

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Миклуш Викторией Александровной, а именно:

- 1) Решение многоцелевой задачи оптимального расположения сенсорных узлов на заданной территории – задача создания сплошного сенсорного поля;
- 2) Алгоритм маршрутизации самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией;
- 3) Имитационная модель самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией

использованы в учебном процессе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) при реализации дисциплин: «Инфокоммуникационные системы и сети», «Методы искусственного интеллекта» и «Теория информации, данные, знания» для направления подготовки 09.03.02 Информационные системы и технологии.

заведующий кафедрой Информационных систем и технологий, д-р техн. наук, доцент

 С.В. Мичурин

профессор кафедры Информационных систем и технологий, д-р техн. наук, профессор

 В.В. Фомин

доцент кафедры Информационных систем и технологий, канд. техн. наук, доцент

 О.И. Красильникова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Копии свидетельств регистрации программ на ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ		<b>RU2022665779</b>
		
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ <b>ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ</b>		
Номер регистрации (свидетельства): 2022665779 Дата регистрации: 22.08.2022 Номер и дата поступления заявки: 2022665470 22.08.2022 Дата публикации и номер бюллетеня: 22.08.2022 Бюл. № 9	Автор(ы): Татарникова Татьяна Михайловна (RU), Миклуш Виктория Александровна (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)	
Название программы для ЭВМ: Программа создания сплошного сенсорного поля на территории с естественными препятствиями		
Реферат: Программа для ЭВМ представляет собой приложение, автоматизирующее эффективное расположение сенсорных устройств с разным радиусом действия на территории с естественными препятствиями. Эффективное расположение сенсорных устройств означает решение задачи оптимизации, целевая функция которой стремится к максимальному покрытию заданной территории зонами чувствительности сенсорных устройств.		
Язык программирования:	MATLAB	
Объем программы для ЭВМ:	640 Кб	
Стр.: 1		

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022665781

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2022665781

Дата регистрации: 22.08.2022

Номер и дата поступления заявки:  
2022665472 22.08.2022

Дата публикации и номер бюллетеня:  
22.08.2022 Бюл. № 9

Автор(ы):

Татарникова Татьяна Михайловна (RU),  
Миклуш Виктория Александровна (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического  
приборостроения» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Имитационная модель установления соединения в самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети

Реферат:

Программа для ЭВМ позволяет создать структуру беспроводной сенсорной сети и обеспечивает проведение имитационного эксперимента по установлению соединения на модели сети.

Программа для ЭВМ способствует определению параметров сетевых узлов и каналов связи для доставки данных от источника адресату с заданной вероятностью достоверной доставки.

Программа для ЭВМ осуществляет оценку вероятностно-временных характеристик доставки пакетов данных.

Язык программирования: C, C++

Объем программы для ЭВМ: 691 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2022665780**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2022665780

Дата регистрации: 22.08.2022

Номер и дата поступления заявки:  
2022665471 22.08.2022

Дата публикации и номер бюллетеня:  
22.08.2022 Бюл. № 9

Автор(ы):

Татарникова Татьяна Михайловна (RU),

Миклуш Виктория Александровна (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического  
приборостроения» (RU)

Название программы для ЭВМ:

**Программа размещения базовых станций в самоорганизованной беспроводной сенсорной сети**

Реферат:

Программа для ЭВМ представляет собой приложение, автоматизирующее выбор расположения базовых станций в беспроводной сенсорной сети. Базовая станция играет роль ретранслятора данных, агрегированных от множества сенсорных устройств. Метрикой выбора расположения базовой станции является евклидово расстояние – дальность распространения сигнала от сенсорного устройства на базовую станцию.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 521 Кб