

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Терентьев Максим Николаевич

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 2.3.1.

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

Диссертация
на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 2023 год

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Беспроводные сенсорные сети в космических системах.....	19
1.1. Преимущества применения БСС в космических системах.....	20
1.2. Характерные особенности БСС в составе космических систем.....	28
1.3. Проблемы применения БСС в КС.....	36
1.4. Показатели работы БСС для космических систем.....	37
1.5. Анализ известных подходов к созданию БСС.....	40
1.6. Класс БСС для космических систем.....	51
Глава 2. Положения, определяющие класс БСС для космических систем.....	54
2.1. Древоподобная структура взаимодействия.....	54
2.2. Использование физических адресов.....	56
2.3. Обновление адреса родителя.....	59
2.4. Дискретный режим работы.....	61
2.5. Синхронизация узлов на основе фактических задержек передачи сообщений.....	63
2.6. Две активные фазы.....	66
2.7. Адаптивное определение параметров АФР.....	70
2.8. Предотвращение передачи дубликатов результатов измерений.....	71
2.9. Случайная задержка результата измерения.....	73
2.10. Буферизация сообщений, управляемая качеством связи с родителем.....	75
Глава 3. Алгоритмы и модели БСС для космических систем.....	80
3.1. Постановка задачи моделирования.....	80
3.2. Структура и задачи модели.....	88
3.3. Радиоканал.....	96
3.4. Автономная работа узла БСС.....	111
3.5. Выбор смещения АФР шлюза.....	136
3.6. Определение долговечности БСС в целом.....	137

Глава 4. Программное обеспечение имитационного моделирования БСС для космических систем.....	141
4.1. Вид моделирования.....	141
4.2. Платформа для построения симулятора.....	142
4.3. Архитектура симулятора.....	144
4.4. Компоненты и подсистемы симулятора.....	147
4.5. Сравнение показателей работы БСС с двумя активными фазами и БСС с одной активной фазой.....	158
Глава 5. Методика проектирования БСС для космических систем.....	163
5.1. Подготовка модели объекта обслуживания.....	163
5.2. Создание связной сети.....	166
5.3. Выбор типа источников питания узлов.....	168
5.4. Определение значений управляющих параметров БСС для космических систем.....	171
5.5. Имитационное моделирование.....	191
Глава 6. Проектирование системы коммуникаций внутри группировки научных наноспутников.....	193
6.1. Группировка наноспутников.....	193
6.2. Постановка задачи проектирования системы коммуникаций и исходные данные.....	201
6.3. Выбор аппаратуры СКГН.....	203
6.4. Проектирование СКГН.....	205
6.5. Результаты проектирования СКГН.....	226
6.6. Сопоставление эффективности СКГН на основе БСС для космических систем с существующими альтернативами.....	227
Заключение.....	229
Список сокращений и условных обозначений.....	232
Список литературы.....	234

Введение

Актуальность работы

Современные возможности и тенденции развития беспроводных сенсорных сетей (БСС) позволяют рассматривать их в качестве перспективной основы при организации коммуникаций в космических системах. Проведённые к настоящему времени исследования показывают, что применение БСС создаёт в космических системах дополнительные потенциальные возможности с эффектом, носящим, в том числе, новый качественный характер. При этом можно рассматривать две группы таких возможностей. К первой группе относится организация мониторинга работы как в орбитальном комплексе (мониторинг состояния бортового оборудования и параметров среды в труднодоступных/закрытых отсеках; мониторинг раскрытия панелей солнечных батарей и антенн; мониторинг психофизиологического состояния членов экипажа космической станции, находящихся в постоянном движении), так и в наземном сегменте (расширение информации дистанционного зондирования Земли за счёт специализированных БСС, например, обнаружения и тушения торфяных пожаров, управления «умными» сельскохозяйственными полями). Вторая группа возможностей БСС направлена на обеспечение коммуникаций между несколькими наноспутниками (обеспечение связи в компактной группировке наноспутников; передача командной и телеметрической информации при стыковке наноспутников).

Внимание к использованию БСС как компонентов инфраструктуры космических систем связано с такими характерными для БСС свойствами как возможности их оперативного развёртывания и длительного функционирования в необслуживаемом режиме, а также с отсутствием влияния на штатные системы космического аппарата. Эти свойства обеспечиваются тем, что каждый из узлов сети способен, функционируя автономно, потреблять экстремально мало энергии входящего в его состав источника питания. Это влечёт за собой необходимость комплектования узлов БСС маломощными электронными

компонентами, в том числе, приёмником/передатчиком малой мощности и микропроцессором малой вычислительной мощности, что, как правило, исключает непосредственную передачу каждым узлом информации в заданное место её сбора и предопределяет необходимость многошаговой передачи данных, используя близлежащие узлы как ретрансляторы. При этом слабость сигналов обмена информацией делает БСС весьма чувствительными к помехам, приводящим к потере передаваемой информации.

Минимизация потерь информации является основной проблемой при создании БСС в разнообразных областях их применения. Исследованиям в этой области, рассматривающим различные аспекты функционирования БСС, посвящены работы D. Estrin [1-5], С. Bettstetter [6, 7], С. Prehofer [7], F. Dressler [8-10], K. Römer [11-13], D. Marinescu [14-15], В.М. Вишневого [16], А.И. Ляхова [17, 18], А.Е. Кучерявого [19, 20], А.М. Баранова [21] и других. В них предложены различные сетевые протоколы и методы функционирования БСС общего назначения без ориентации на специфику конкретного использования, в частности, в космических системах, где на первый план выходит комплекс требований обеспечения надёжной связи при предельном сокращении расхода энергии и необходимости обслуживания объектов изменяемой конфигурации и большого масштаба. Работы, посвящённые формированию БСС, удовлетворяющих названному сочетанию требований на регулярной научно обоснованной основе, не известны. В связи с этим актуальна представленная в настоящей работе разработка теоретических и практических основ формирования систем коммуникаций и мониторинга космических систем на основе БСС в соответствии с потребностями расширения функциональных возможностей космических систем различного назначения, в том числе по уровню надёжности.

Цель работы

Целью работы является расширение функциональных возможностей космических систем в части решения задач коммуникаций в компактных группировках космических аппаратов и задач мониторинга как на борту

космического аппарата, так и в наземном сегменте за счёт включения в их состав специального класса БСС, ориентированного на эффективное решение названных задач.

Решаемые задачи

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические задачи:

1. Научно обоснованы целесообразность использования БСС в космических системах и необходимость разработки класса БСС для космических систем, учитывающего их требования: обеспечение заданного уровня надёжности при одновременном снижении расхода энергии.
2. Предложен и теоретически обоснован класс БСС для космических систем, обладающий высокой надёжностью доставки информации и сниженным расходом энергии источника питания.
3. Разработана модель БСС для космических систем, связывающая характеристики обслуживаемого объекта, топологические и функциональные параметры БСС с показателями её работы.
4. Разработан и реализован программно-методический комплекс проектирования БСС для космических систем, обеспечивающий создание БСС с заданными значениями показателей работы.
5. Проведена практическая апробация результатов, полученных при решении названных выше задач, путём решения актуальной практической задачи проектирования системы коммуникации внутри группировки научных наноспутников.

Область исследования

Областью исследований являются теоретические основы, методы функционирования и система (программно-методический комплекс) проектирования адаптивных самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей, обеспечивающие решение задач коммуникаций в группировках космических аппаратов и мониторинга как на борту космического аппарата, так и

в наземном сегменте космических систем. Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), так как в исследовании решаются задачи и получены результаты, относящиеся к таким направлениям как

- разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задачи создания БСС, удовлетворяющей требованиям космических систем по надёжности и величине расхода энергии;
- разработка методов и алгоритмов решения задачи создания БСС для космических систем;
- разработка специального математического и алгоритмического обеспечения принятия решений при проектировании БСС для космических систем;
- методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации БСС для космических систем.

Методы исследования

В исследовании используются методы системного анализа, самоорганизующихся систем, теории цифровой связи, телекоммуникационных сетей, теории вероятностей, теории массового обслуживания, имитационного моделирования и статистических испытаний. В реализации программно-методического комплекса использованы парадигмы объектного программирования и программирования, управляемого событиями.

Объект исследования

Объектом исследования являются орбитальный и наземный сегменты космической системы.

Предмет исследования

Предметом исследования является разработка теоретических основ, модельно-алгоритмического обеспечения и программно-методического комплекса анализа и синтеза систем коммуникации на основе БСС.

Научная новизна работы

Научная новизна работы определяется тем, что в ней предложен и теоретически обоснован (исследован) новый класс БСС, отличающийся наличием двух активных фаз на каждом сеансе приема-передачи информации, что обеспечивает соответствие требованиям космических систем, а именно: высокую надёжность транспортировки информации, а также низкий расход энергии в условиях отсутствия доступа к узлам сети для их обслуживания.

На защиту выносятся:

1. Научное обоснование целесообразности использования БСС в космических системах и необходимости разработки специального класса, учитывающего определяемые спецификой космических систем требования: обеспечение заданного уровня надёжности при одновременном снижении расхода энергии.
2. Теоретические основы класса БСС для космических систем и составляющие их теоретические положения, принципиально отличающие предложенный класс БСС от известных и обеспечивающие достижение соответствия требованиям космических систем. Основным является положение о том, что дискретный режим работы предложенной БСС содержит две активные фазы: одна предназначена для построения структуры взаимодействия узлов, а другая — для передачи результатов измерений.
3. Модель БСС для космических систем, включающая
 - параметризацию объекта обслуживания, узлов БСС и радиоканала,
 - отношения на интегральном множестве параметров БСС, объекта обслуживания, показателей надёжности и величины расхода энергии, включая связи, определяемые алгоритмами работы узлов, реализующими разработанные теоретические положения класса БСС для космических систем.
4. Программно-методический комплекс, включающий программный симулятор функционирования БСС предложенного класса в условиях,

определяемых обслуживаемой космической системой, и методическое обеспечение, позволяющее выполнять синтез и анализ такой БСС.

5. Результаты решения актуальной практической задачи проектирования системы коммуникации внутри группировки научных наноспутников и их сопоставление с результатами, демонстрируемыми применяющимися в настоящее время системами коммуникаций.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней разработаны и практически апробированы теоретические основы построения и функционирования нового класса БСС, специализированного для решения важной научно-технической проблемы — расширения функциональных возможностей космических систем в части решения задач коммуникаций в орбитальных группировках космических аппаратов и мониторинга как на борту космического аппарата, так и в наземном сегменте космических систем.

Практическая значимость работы состоит в создании новых технических решений, внедрение которых имеет существенное значение для расширения функциональных возможностей космических систем. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития наземного и космического сегментов. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Впервые предложен и исследован класс БСС для космических систем, учитывающий определяемые спецификой космических систем требования: обеспечение заданного уровня надёжности при одновременном снижении расхода энергии.

2. Разработан программно-методический комплекс проектирования БСС для космических систем, позволяющий выполнять синтез и анализ таких БСС.

3. Подтверждена возможность снижения затрат энергии на коммуникации в космической системе в результате применения БСС разработанного класса.

Сведения о практическом использовании полученных научных результатов

Основные результаты работы использованы в рамках выполнения работ по следующим проектам: грант РФФИ №14-08-01028 «Разработка принципов построения и функционирования многошлюзовых беспроводных самоорганизующихся сетей с оптимизацией маршрутов передачи данных», грант РФФИ №17-08-01641 «Исследование класса беспроводных сенсорно-управляющих сетей с облачным хранением и обработкой данных и кроссплатформенным отказоустойчивым доступом для различных клиентских устройств с возможностью автономной работы».

Достоверность результатов

Достоверность результатов определяется строгостью изложения, корректным использованием математического аппарата, подтверждена методами имитационного моделирования и статистических испытаний, отсутствием противоречий с основными фактами теории и практики в области исследований. Основные теоретические положения подтверждены успешной практической реализацией при внедрении результатов исследования.

Апробация работы

Основные результаты доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании ИНФОТЕХ–2009», 3-й международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2009», 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009», 4-й всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», международной конференции «Distributed Computer and Communication Networks. Theory and Applications (DCCN-2010)», 9-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010», международной конференции «International Conference of Innovative Technologies “IN-TECH 2011”», международной научно-практической конференции «Информационные

технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании ИНФОТЕХ-2015», 5-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», 7-й международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2017», 17-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2018», общероссийской научно-практической конференции «Вопросы инновационного развития аэрокосмического комплекса России», 18-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019», международном московском IEEE-семинаре по электронным и сетевым технологиям (MWENT-2020), 4-й международной конференции «Computational Methods in Systems and Software (CoMeSySo-2020)», 19-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2020».

Публикации

Список публикаций по теме диссертации содержит 47 наименований, из них 13 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных, 1 – монография, 3 – учебные пособия, 22 – материалы конференций, 6 – свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад

Представленные результаты исследований получены соискателем лично. Эти исследования включают формализацию и постановку задачи, формулирование принципов работы, разработку моделей и алгоритмов, создание на их основе методического и программного обеспечения, получение и анализ результатов. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию вошёл только материал, принадлежащий автору лично. Заимствованные положения обозначены ссылками на их источники.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературных источников из 147 наименований. Работа изложена на 250 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка и 13 таблиц.

Основное содержание работы

Первая глава диссертационной работы посвящена представлению беспроводных сенсорных сетей как самостоятельного класса подсистем в составе различных сегментов космических систем. Анализируются преимущества и выявляются проблемы, связанные с использованием беспроводных сенсорных сетей для коммуникаций и мониторинга в космических системах. Расширение возможностей космических систем, обеспечиваемое применением БСС, продемонстрировано на примере задач организации коммуникаций в компактной спутниковой группировке, непрерывного мониторинга психофизиологического состояния экипажа космической станции, системы обнаружения и контроля тушения торфяных пожаров, мониторинга раскрытия панелей солнечных батарей и др. Показано, что применение БСС позволяет космическим системам приобрести новые, недостижимые иными способами возможности, что свидетельствует о целесообразности использования БСС в составе космических систем.

Рассмотрены собственные характерные особенности БСС (малая мощность передатчиков, конкурентный доступ к каналу, низкая скорость трансляции данных, наличие датчиков), а также влияющие на БСС характерные особенности космических систем (необходимость снижения потребления энергии, постоянное изменение конфигурации, большой масштаб). В результате совместного анализа этих характерных особенностей сформулированы проблемы применения БСС в космических системах — необходимость снижения расхода энергии и необходимость повышения надёжности.

Для решения проблемы снижения расхода энергии БСС переводится в дискретный режим, чередующий краткие активные фазы и длительные фазы сна,

вводимые для экономии энергии. Решая проблему снижения расхода энергии, дискретный режим порождает необходимость согласования режимов работы узлов БСС во избежание потерь информации. Проблема повышения надёжности обусловлена возможностью потерь информации вследствие изменения конфигурации космической системы, несогласованной работы узлов БСС и высокого уровня конкуренции за радиоканал. Совместное решение проблем снижения расхода энергии и повышения надёжности БСС обеспечивается методом функционирования БСС.

Определены показатели работы БСС: масштабируемость, скорость доставки сообщений, возможность использования произвольных маршрутов, готовность, надёжность, долговечность и расход энергии. Отмечено, что во всех рассмотренных задачах (связь внутри орбитальной группировки наноспутников, мониторинг на борту КА, создание производных продуктов на основе ЕТРИС ДЗЗ) критически важны надёжность, определяемая как доля сообщений, успешно доставленных потребителю информации, и величина расхода энергии, определяемая как израсходованная часть запаса энергии источника питания. Поэтому для оценки качества работы БСС в составе космических систем должны использоваться эти два показателя.

Проанализированы известные методы функционирования БСС. Рассмотрены Mobile Ad Hoc Network (MANET), Sensor MAC, Self-organizing Sensor Network (SFSN). Показано, что вследствие сочетания ранее выявленных особенностей космических систем (необходимость снижения потребления энергии, постоянное изменение конфигурации, большой масштаб) ни один из известных методов не пригоден для организации коммуникаций и мониторинга в космических системах. На основании проведённого анализа сделан вывод о том, что существующие классы БСС ориентированы на достижение высоких значений всех характеристик работы БСС, не только надёжности и низкого расхода энергии, но и готовности, и возможности использования произвольных маршрутов передачи сообщений и др. Поэтому для работы в составе космических систем,

требующих от БСС высокой надёжности и низкого расхода энергии, необходимо разработать новый класс БСС для космических систем, обеспечивающий требуемые значения надёжности при сниженном расходе энергии в ущерб остальным характеристикам.

Во **второй главе** работы формулируются основные теоретические положения, определяющие работу узлов нового класса БСС для космических систем. Показано, что в дискретном режиме активная деятельность каждого узла состоит из синхронизации и ретрансляции результатов, между которыми узлы находятся в состоянии простоя. Основным является положение об усовершенствовании дискретного режима: период простоя предложено заменить кратким сном, позволяющим дополнительно экономить энергию. Теперь на каждом периоде работы присутствует две активные фазы — фаза синхронизации и фаза сбора результатов. Расположение активных фаз индивидуально для различных узлов, что сокращает непроизводительные расходы их энергии, повышая долговечность. На фазе синхронизации строится структура взаимодействия узлов — древовидная с использованием физических адресов, а также синхронизируются часы узлов. Построенная структура взаимодействия затем используется на фазе сбора результатов. Снижение конкуренции за канал, высокой при обслуживании объектов большого масштаба, достигается введением случайной задержки передачи результатов измерений. Сохранение на узлах информации об успешно обработанных сообщениях позволяет предотвратить повторную передачу по сети дубликатов сообщений, появляющихся в результате их повторной отправки при неполучении отправителем подтверждения об успешном приёме. Объединение результатов измерений в буфер, размер которого определяется в зависимости от качества связи (чем выше качество связи, тем больше размер буфера), снижает нагрузку на канал при высоком качестве связи и повышает вероятность доставки сообщений при низком качестве связи. Длительность активной фазы сбора результатов определяется узлами самостоятельно.

В **третьей главе** работы представлены модель и алгоритмы работы БСС для космических систем. Эта модель состоит из модели объекта обслуживания, моделей узлов БСС, модели радиоканала и управляющих параметров. Модель объекта обслуживания включает его составные части, помехи, закон изменения конфигурации (перемещения составных частей и помех), а также модель потерь при распространении радиоволн. Модель узла БСС включает в себя модель его автономной работы и модель интерфейса с радиоканалом.

Представлена общая схема функционирования измерителей и шлюзов узлов БСС. Детализированы составляющие автономную работу узлов БСС процессы: синхронизация, планирование работы и диспетчеризация, построение структуры взаимодействия, сбор результатов измерений, а также учёт расхода энергии источника питания. Представлен интерфейс между узлом БСС и радиоканалом: моделирование доступа к каналу в режиме конкуренции и моделирование приёма сообщения в условиях воздействия помех. Модель радиоканала обеспечивает учёт потерь при распространении сигналов (определяемых в соответствии с ассоциированной с объектом обслуживания моделью), учёт состояния канала (в том числе в результате воздействия помех), и оповещение узлов о поступлении сообщений. Расход энергии и долговечность БСС определяется соответствующими моделями. Модель определения долговечности учитывает снижение надёжности БСС вследствие выхода из строя отдельных узлов.

БСС для космических систем является распределённой самоорганизующейся системой, включающей причинно-следственные связи, а также связи, представленные в виде алгоритмов. По этой причине модель строится как имитационная, основанная на дискретно-событийном и агентном подходах.

В **четвёртой главе** работы представлено созданное на основе модели БСС для космических систем программное обеспечение имитационного моделирования — симулятор, использующий дискретно-событийное агентное моделирование. В качестве платформы при создании симулятора выбран

симулятор сетей ns3. Архитектура симулятора БСС включает подсистему ввода исходных данных, ядро симулятора (включая очередь событий), модели узлов БСС и радиоканала, подсистему диагностической информации, статистики и журнала. Исходными данными для симулятора являются характеристики объекта обслуживания, расположение узлов БСС и значения управляющих параметров модели БСС. Основными результатами работы симулятора являются показатели надёжности, величины расхода энергии и долговечности БСС, соответствующие заданным значениям топологических и функциональных параметров. Вспомогательными результатами являются журнал, регистрирующий происходящие при работе БСС события, и диагностическая информация. Диагностическая информация поясняет причины снижения показателей работы БСС и используется при целенаправленном поиске рациональных значений управляющих параметров. При помощи созданного симулятора выполнено сравнение показателей работы БСС для космических систем с показателями, демонстрируемыми БСС, из метода работы которой исключены положение о двух активных фазах и дополняющие его положения. При одинаковой надёжности долговечность БСС для космических систем в 2.07 раза выше.

В **пятой главе** работы представлена методика проектирования БСС для космических систем, опирающаяся на использование созданного симулятора. Эта методика обеспечивает оценку качества работы БСС и выбор рациональных значений параметров. Методика состоит из нескольких этапов: этапа подготовки модели объекта обслуживания, этапа создания связной беспроводной сети, этапа выбора типа источников питания узлов, этапа выбора рациональных значений параметров работы БСС. Принятые проектные решения оцениваются по значениям показателей работы БСС, получаемым в результате имитационного моделирования с помощью представленного в четвёртой главе симулятора. Методика проектирования имеет итерационный характер: при неудовлетворительных значениях показателей работы БСС последовательность этапов, начиная с некоторого, должна быть выполнена повторно. Например, если

надёжность БСС неудовлетворительна из-за того, что определённые узлы систематически оказываются вне сети и не передают свои результаты, на этапе обеспечения связности беспроводной сети могут быть добавлены дополнительные маршрутизаторы. Решение о том или ином изменении проектных параметров принимается на основе анализа диагностической информации и журнала симулятора.

Шестая глава работы посвящена апробации класса БСС для космических систем, его модели и алгоритмов, симулятора и методики проектирования при разработке системы коммуникаций внутри группировки научных наноспутников. Эта группировка измеряет ионосферные задержки сигналов спутниковых навигационных систем, что позволяет определить текущее состояние ионосферы в интересующем месте Земли без использования данных наземных ионосферных станций. Необходимость минимизации потребления энергии системой коммуникаций обусловлена низкой отдачей энергии от солнечных батарей, вызванной малыми размерами составляющих группировку наноспутников формата Cubesat 1U, и наличием в составе наноспутника двигательной установки, потребляющей значительное количество энергии при коррекции орбиты. В связи с необходимостью радикального сокращения потребления энергии проектируемой системой она строится на основе предложенного во второй главе класса БСС для космических систем. Проектирование системы коммуникаций внутри группировки наноспутников выполняется в соответствии с предложенной в пятой главе методикой: выбраны основные аппаратные компоненты узла БСС (трансивер, усилитель мощности, микропроцессор), выполнены все предусмотренные методикой этапы проектирования. Представленный в четвёртой главе симулятор БСС адаптирован к решаемой задаче: программа дополнена моделированием возмущённого движения наноспутников, проведением оптимальной коррекции орбиты, учётом расхода рабочего тела. С помощью адаптированного симулятора получены результаты — определены значения показателей работы для 1080 сочетаний проектных параметров. На основе анализа

полученных результатов выбрано рациональное сочетание значений проектных параметров БСС, доставляющие минимум среднему расходу энергии узлами при выполнении ограничения на надёжность БСС.

Сопоставление затрат энергии спроектированной системы коммуникации на основе БСС для космических систем с характеристиками используемых на сегодняшний день в наноспутниках систем связи показало, что расход энергии у системы на основе БСС на 37,5% ниже, чем у ближайшей альтернативы. Это подтверждает эффективность применения класса БСС для космических систем, его модели, алгоритмов и методики проектирования при организации коммуникаций внутри группировки наноспутников.

Глава 1. Беспроводные сенсорные сети в космических системах

Настоящая глава посвящена представлению БСС как самостоятельного класса подсистем в составе различных сегментов космических систем: орбитальных группировок, бортовых отсеков, наземного сегмента, интегрированного с внешними комплексами различного назначения. Показано, что специфика БСС, а именно, их оперативное развёртывание, отсутствие необходимости обслуживания и отсутствие влияния на штатные компоненты космических систем определяет широкие возможности их использования в этих системах. При этом сформулированы особенности БСС, предназначенных для включения в состав космических систем, и определены требования к ним, на достижение которых направлены следующие главы работы.

ГОСТ определяет космическую систему (КС) как «совокупность одного или нескольких космических комплексов и специальных комплексов, предназначенных для решения целевых задач» [22]. В свою очередь космический комплекс (КК) есть «совокупность функционально взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, обеспечивающих как самостоятельное решение целевых задач на основе использования космического пространства, так и в составе космической системы», а специальный комплекс (СпК КС) — «совокупность взаимосвязанных технических средств или аппаратуры приёма и передачи информации с программным обеспечением, сооружений, предназначенных для приёма специальной информации космических аппаратов, её регистрации, обработки, хранения и представления потребителям». Из этих определений следует, что элементы КК и СпК КС распределены в пространстве, поэтому одной из решаемых КС задач является обеспечение надёжного обмена целевой и вспомогательной информацией.

Перспективной основой для организации коммуникаций в КК и СпК КС являются обладающие сверхнизким потреблением энергии и не требующие предварительного создания инфраструктуры беспроводные сенсорные сети (БСС). Применение БСС позволяет существенно снизить затраты энергии на передачу данных, а также оперативно организовать мониторинг параметров работы КК и СпК КС. Рассмотрим несколько групп задач, решение которых с помощью БСС добавляет КС новые, не достижимые другими известными способами возможности.

1.1. Преимущества применения БСС в космических системах

Новые возможности КС, создаваемые при помощи БСС, продемонстрируем при рассмотрении нескольких групп задач:

- 1) организация коммуникаций в компактной орбитальной группировке (ОГ),
- 2) мониторинг на борту космического аппарата (КА),
- 3) расширение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при помощи наземной БСС.

1.1.1. Коммуникации в компактной ОГ

Рассмотрим использование БСС для организации коммуникаций в компактной ОГ, состоящей из нескольких управляемых наноспутников формата CubeSat 1U. Эти наноспутники имеют размер 100x100x100 мм, и на них применяются панели солнечных батарей размером менее 100x100 мм с отдачей мощности от панели менее 2,5 Вт [23]. Основным потребителем энергии на управляемом наноспутнике является электроракетный двигатель, требующий во время работы до 5 Вт [24]. Таким образом, остальная аппаратура наноспутника работает в условиях дефицита энергии. При небольших расстояниях между наноспутниками, характерных для компактной ОГ, обеспечение коммуникаций внутри ОГ на основе БСС требует для своей работы меньше энергии, чем

известные альтернативы. Поэтому использование БСС для организации коммуникаций внутри ОГ позволяет снизить общий расход энергии или перераспределить её для решения других задач, см. дерево целей и задач (ДЦЗ) на рис. 1.1. Более подробно данная задача и её решение рассмотрены в главе 6.

Вариантом данной задачи является передача командной и телеметрической информации между наноспутниками при решении актуальной задачи организации их сближения и стыковки [25].



Рис. 1.1. Основные элементы ДЦЗ ОГ наноспутников

Использование БСС при организации коммуникаций внутри ОГ сокращает затраты критического ресурса наноспутника — электрической энергии, позволяя перенаправить её на обеспечение решения других задач, в первую очередь на обеспечение работы двигательной установки.

1.1.2. Мониторинг на борту КА

Преимущества, предоставляемые БСС при организации мониторинга параметров на борту КА, рассмотрим на примере нескольких задач, относящихся как к пилотируемым, так и к беспилотным аппаратам.

Непрерывный мониторинг психофизиологического состояния экипажа.

Обеспечение безопасности и сохранение высокого уровня работоспособности экипажа является одной из наиболее актуальных проблем при реализации длительных космических полётов. В настоящее время эта проблема актуальна для программы полётов на международной космической станции (МКС), в проектах полёта человека на Луну и Марс, а также при проведении длительных наземных экспериментов.

Система непрерывного мониторинга психофизиологического состояния экипажа, не ограничивая двигательной активности космонавтов, должна функционировать фактически непрерывно во время обычной жизнедеятельности космонавтов. Она состоит из закреплённых на костюмах маяков, регистрирующих местонахождение членов экипажа и объективные показатели их психофизиологического состояния (электрокардиограмма, частота сердечных сокращений, насыщенность крови кислородом, частота дыхания, кожно-гальваническая реакция), и реперов с известным положением, рис. 1.2. Питание маяков осуществляется от гальванических элементов. Передача информации между маяками и бортовым медицинским компьютером (БМК) выполняется при помощи БСС [26]. В этом случае сверхнизкий расход энергии БСС обеспечивает необходимую долговечность измерителей, что позволяет достичь основной цели исследования — его непрерывности.

Рассмотренную задачу можно обобщить на все те случаи, в которых сетевой источник питания по каким-либо причинам не может быть применён и для электропитания измерителей используется автономный невозобновляемый источник питания.

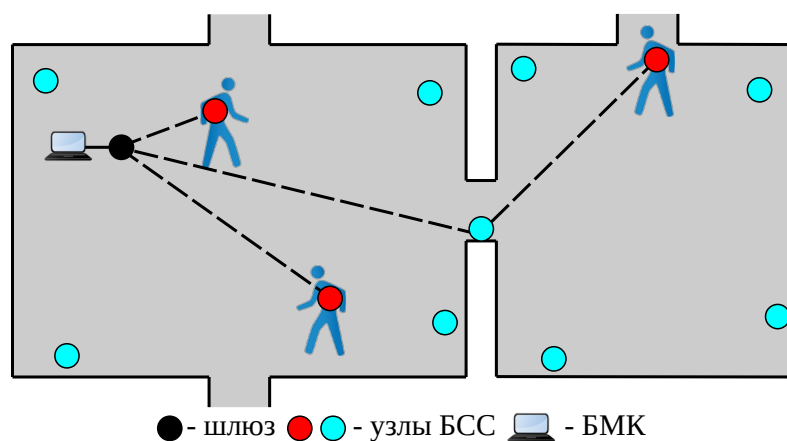


Рис. 1.2. БСС системы непрерывного мониторинга психофизиологического состояния экипажа

Мониторинг состава атмосферы пилотируемого КА. Долгосрочный мониторинг химических веществ в составе атмосферы МКС демонстрирует постоянное расширение состава обнаруженных летучих органических соединений (ЛОС). Это связано с тем, в оборудовании МКС широко применяются различные полимеры. ЛОС в атмосфере МКС негативно влияют на состояние здоровья и производительность труда экипажа, а также могут воздействовать на штатную и научную аппаратуру. Ситуация с ЛОС на МКС может быть обобщена на другие длительные пилотируемые космические полёты, например, к Марсу.

Задача долгосрочного мониторинга атмосферы КА и локализации источника ЛОС может быть решена при помощи датчиков ЛОС. Временные проводные коммуникации, проходящие через переходные люки между модулями, на МКС не допускаются, так как такие коммуникации ограничивают возможность экстренного закрытия люков, например, в случае разгерметизации отдельных модулей. Поэтому для передачи результатов измерений датчиков ЛОС должна использоваться беспроводная связь, а именно БСС как наименее энергозатратная система. Одна часть узлов этой БСС может располагаться в фиксированных местах — они позволяют обнаружить проявление того или иного ЛОС в атмосфере КА. Для этого стационарные узлы должны быть оснащены датчиками

всех ожидаемых ЛОС. Другая часть узлов БСС должна обладать двумя возможностями: 1) смены чувствительного элемента (датчика), 2) размещения в любом необходимом месте внутреннего пространства КА. Экипаж КА, обнаружив при помощи стационарных узлов появление нового ЛОС, устанавливает на подвижные узлы датчики обнаруженного ЛОС и размещает эти узлы в модулях КА. Отклонение концентрации искомого ЛОС в некотором модуле в большую сторону позволяет принять решение о переносе остальных подвижных узлов в этот модуль для уточнения положения источника ЛОС.

ДЦЗ пилотируемого КА и место в нём БСС приведены на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Основные элементы ДЦЗ пилотируемого КА

Передача результатов измерений при помощи БСС обеспечивает непрерывность и демонстрирует возможность оперативного развёртывания и

выполнения незапланированных заранее измерений, потребность в которых возникает при долгосрочной эксплуатации КА.

Мониторинг раскрытия панелей солнечных батарей КА. При выведении на орбиту солнечные батареи (СБ) и антенны КА находятся в стартовой конфигурации, в сложенном виде. Для приведения панелей СБ и антенн в рабочую конфигурацию происходит их раскрытие. Мониторинг процесса раскрытия осуществляется при помощи датчиков (герконов), установленных в нескольких местах конструкции. Когда контролируемый датчиком элемент занимает требуемое положение, контакты геркона замыкаются, свидетельствуя об успешности раскрытия контролируемого элемента.

Количество датчиков определяется конструкцией СБ, включающей в себя крылья из нескольких створок. Например, на КА «Метеор-М» СБ состоят из двух крыльев по четыре створки в каждом, а на КА «Канопус» имеется два крыла из трёх створок и одной поворотной рамы. Раскрываемые антенны также состоят из нескольких подвижных створок. При установке на каждую из подвижных створок двух датчиков общее их количество составляет порядка 20.

Подключение такого количества датчиков к общей информационной шине КА увеличивает нагрузку на неё, а отказ любого из датчиков может полностью вывести шину из строя. Учитывая вспомогательный характер рассматриваемой системы, а также то, что эта система используется лишь один раз, вместо проводных соединений датчиков с информационной шиной перспективно использовать БСС. Это повышает надёжность системы, а также снижает массу конструкции, исключая провода и разъёмы.

Решение этой задачи при помощи БСС повышает надёжность КА и снижает его массу.

1.1.3. Расширение возможностей дистанционного зондирования Земли — система мониторинга торфяных пожаров

Тушение торфяных пожаров осложнено двумя обстоятельствами. Во-первых, торф насыщен воздухом, что позволяет ему продолжать горение даже в условиях изоляции под землёй. Во-вторых, слоистая структура торфа препятствует выходу продуктов горения на поверхность, что затрудняет обнаружение подземного очага горения по спутниковым снимкам.

Система мониторинга торфяных пожаров расширяет данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за счёт их комбинирования с измерениями размещённой на торфянике наземной БСС, состоящей из сотен/тысяч узлов, измеряющих температуру и влажность в подземном слое торфа, рис. 1.4. Для этого датчики температуры узлов БСС заглубляются под землю [27].

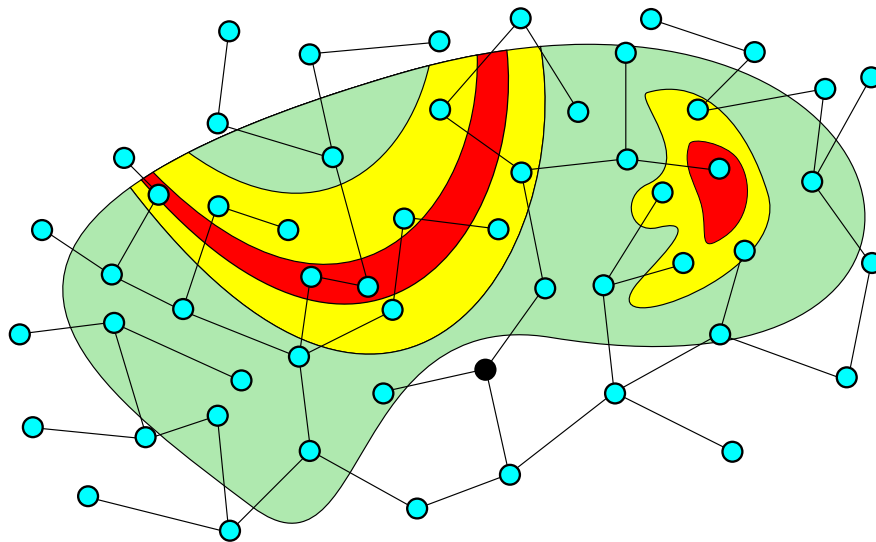


Рис. 1.4. Расположение на торфянике узлов наземной БСС системы обнаружения и контроля тушения торфяного пожара

Создание системы мониторинга торфяных пожаров, включающей наземную БСС, расширяет возможности ДЦЗ, позволяет создавать производные продукты на основе данных Единой территориально-распределённой информационной системы (ЕТРИС) ДЦЗ. Помимо тушения торфяных пожаров производные продукты на базе ЕТРИС ДЦЗ могут быть созданы для интеллектуализации сельскохозяйственных предприятий (умные поля, умные фермы) и городских территорий (умный город).

В системе мониторинга торфяных пожаров БСС решает задачи 1) самоорганизации сети для минимизации потерь данных в случае выхода из строя (повреждения пожаром) некоторой части узлов и 2) сокращения расхода энергии автономных невозобновляемых источников питания узлов для обеспечения необходимой долговечности сети, рис. 1.5.



Рис. 1.5. Основные элементы ДЦЗ системы мониторинга торфяных пожаров

Обобщая рассмотренные задачи, можно сделать вывод о том, что применение БСС позволяет КС приобрести новые, недостижимые иными способами возможности. Это позволяет решить важную научно-техническую проблему — расширить функциональные возможности космических систем — и свидетельствует о целесообразности использования БСС в составе КС.

1.2. Характерные особенности БСС в составе космических систем

Ранее была показана целесообразность применения БСС в космических системах. Однако для получения преимуществ, обеспечиваемых применением БСС в космической системе, должен быть решён ряд сопутствующих проблем. Рассмотрим собственные характерные особенности БСС, а также влияющие на БСС характерные особенности КС. Затем на основе совместного анализа этих групп характерных особенностей сформулируем проблемы применения БСС в КС.

1.2.1. Собственные характерные особенности БСС

Текущее состояние исследований в области БСС отражено в стандарте IEEE 802.15.4 [28], регулирующем физический и канальный уровни стека протоколов БСС.

Малая мощность передатчиков. БСС выделяются из прочих промышленных беспроводных компьютерных сетей (WiFi, Bluetooth, WiMAX, GSM, UMTS, LTE и т. д.) сверхнизким потреблением энергии [29, 30]. Сверхнизкое потребление энергии компонентами узлов БСС в первую очередь определяется малой мощностью передатчиков. Стандарт IEEE 802.15.4 установил, что мощность передатчиков регулируется местным законодательством. Решением Государственной комиссии по радиочастотам при министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации «Об использовании радиоэлектронными средствами фиксированного беспроводного доступа гражданского назначения полосы радиочастот 2400-2483,5 МГц (с изменениями на 29 февраля 2016 года)»

[31] для нелицензируемых передатчиков в диапазоне 2400-2483,5 МГц установлена максимальная мощность передачи, равная 20 дБ·мВт. На рынок производители электронных компонентов поставляют трансиверы с много меньшей максимальной мощностью передачи, например, 0 дБ·мВт [32] и 5 дБ·мВт [33]. Очевидно, что в ОГ КС мощность передачи может быть установлена более высокой, но это автоматически повышает затраты энергии.

Низкая мощность передатчиков БСС делает, как правило, невозможной непосредственную передачу информации от измерителя в центр управления. Вместо этого информация передаётся с использованием многошаговых маршрутов через промежуточные узлы сети. Многошаговая передача энергетически выгоднее, т. к. с ростом расстояния затраты энергии растут не линейно (при передаче в пустом пространстве — пропорционально второй степени расстояния, см. модель потерь при распространении в главе 3).

Конкурентный доступ к каналу. При использовании единого частотного канала одновременно работающие соседние узлы влияют друг на друга. Во избежание наложения в канале нескольких сообщений (такое наложение называется *коллизией*) доступ к каналу организуется в режиме конкуренции: прежде, чем начать свою передачу, узел должен убедиться в том, что канал свободен. Если канал оказывается занят, узел должен выдержать случайную паузу, а затем снова проверить состояние канала. Это вносит в передачу сообщений случайные задержки. Чем больше соседних узлов конкурирует за канал, тем больше величина таких задержек. После выполнения установленного числа неуспешных попыток узлы отказываются от передачи своих сообщений. Следовательно, уровень конкуренции за канал влияет на успешность доставки сообщений: чем выше конкуренция, тем больше потери, см. рис. 1.6.



Рис. 1.6. Связь вероятности успешной доставки сообщения с нагрузкой на канал в БСС

Низкая скорость трансляции данных. Соответствующие стандарту IEEE 802.15.4 трансиверы передают данные со скоростью 250000 бит/с. Во избежание монополизации радиоканала каким-либо одним узлом размер сообщения ограничен 127 байтами. Малый размер сообщения дополнительно снижает пропускную способность канала. Отступление от этого стандарта с целью повышения скорости трансляции данных неизбежно увеличивает затраты энергии. Следовательно, в БСС передача больших объёмов данных за короткое время не возможна.

Наличие датчиков. Наличие в составе узлов датчиков¹ выделяет БСС в отдельный класс сетей, позволяя им выполнять мониторинг, и определяет основную задачу БСС: регистрация полученных от датчиков данных и их передача в центр управления при помощи радиоканала.

Перечисленные особенности определяют состав узлов БСС: датчики для выполнения измерений; трансивер для приёма и передачи сообщений по

¹ Функции датчика может выполнять любой источник информации.

радиоканалу; простой микропроцессор для управления работой узла БСС; источник питания (ИП). Узлы БСС способны выполнять следующие функции:

1. Выполнение измерений полей физических величин (например, температура, напряжение в конструкции, вибрация и т. д.).
2. Простая обработка результатов измерений (например, перевод результата измерения аналогового датчика в цифровую форму).
3. Приём и передача сообщений по радиоканалу (например, передача собственного результата измерения, приём и ретрансляция результатов измерений других узлов).

Узлы играют в БСС одну или несколько ролей. Одни узлы расположены в точках, в которых возникает потребность в передаче некоторой информации или значения полей физических величин в которых представляет интерес для мониторинга. Эти узлы выполняют измерения, при необходимости обрабатывают их и передают результаты по радиоканалу. Будем называть такие узлы *измерителями*. Они обеспечивают выполнение измерений.

Другие узлы принимают результаты по радиоканалу и ретранслируют их далее с целью доставки результатов измерений в центр управления. Расположение таких узлов призвано обеспечить связность БСС. Будем называть такие узлы *маршрутизаторами*. Они обеспечивают связность сети.

Также в сети существуют один или несколько особых узлов, которые, помимо того, что являются узлами БСС, имеют линии связи с центром управления. Эти узлы принимают по радиоканалу результаты измерений и по имеющимся у них линиям связи, проводным или беспроводным, передают принятые результаты в центр управления. Такие узлы будем называть *шлюзами*.

Подчеркнём, что в БСС возможно совмещение ролей узлов. Таким образом, измеритель при необходимости может ретранслировать чужие результаты измерений, а шлюз — выполнить измерения.

Таким образом, собственными характерными особенностями БСС являются малая мощность передатчиков, конкурентный доступ к каналу, низкая скорость трансляции данных и наличие датчиков.

1.2.2. Влияние на БСС характерных особенностей КС

К характерным особенностям КС, влияющим на систему коммуникаций на основе БСС, относятся необходимость снижения потребления энергии, изменение конфигурации и большой масштаб КС. Покажем это.

Необходимость снижения потребления энергии БСС при работе в составе КС может быть вызвана изначальной мотивацией (организация коммуникаций в ОГ наноспутников) или стремлением увеличить срок службы (долговечность) узлов БСС при использовании автономных невозобновляемых источников питания (задачи мониторинга на борту КА, создание производных продуктов на основе ЕТРИС Д33). Основные компоненты узлов БСС обладают способностью к переходу в состояние сна, снижающей потребление энергии на несколько порядков. Для реализации этой возможности в БСС организуется *дискретный режим* работы, чередующий активные фазы, на которых БСС выполняет измерения и передаёт их результаты в центр управления, и фазы сна [34], на которых энергия практически не потребляется. Обозначим длительность активной фазы τ , а длительность полного цикла работы², включающего активную фазу и фазу сна, T . Применение дискретного режима снижает потребление энергии практически в

$$k = T / \tau \quad (1.1)$$

раз. Строго говоря, $k = \frac{T I_{раб}}{\tau I_{раб} + (T - \tau) I_{сон}}$, где $I_{раб}$ — ток, потребляемый узлом во время работы, $I_{сон}$ — ток, потребляемый узлом во время сна. Однако при обычном соотношении $I_{раб} / I_{сон} = 10^4 \div 10^5$ вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь и в результате получаем (1.1).

2 Полный цикл работы БСС также называется периодом работы.

Будем полагать, что значение T , определяющее периодичность выполнения измерений, задано директивно и изменено быть не может. Поэтому увеличение значения k может быть достигнуто только уменьшением значения τ .

БСС, работающая в дискретном режиме, может выполнять измерения и передавать их результаты только на активных фазах. Снижая потребление энергии, дискретный режим порождает необходимость синхронизации работы узлов БСС, т. е. согласования смены узлами фаз рабочего цикла. В противном случае, если адресат сообщения находится на фазе сна, переданное сообщение будет потеряно. Вследствие погрешностей используемых средств отсчёта времени согласование смены фаз рабочего цикла должно выполняться периодически. Кроме того, дискретный режим повышает вероятность потери данных, концентрируя обмен сообщениями между узлами на кратких активных фазах. Все сообщения, которые в непрерывном режиме могли быть распределены по периоду T , в дискретном режиме сосредоточены на активной фазе. При обычном соотношении $\tau \ll T$ в дискретном режиме уровень конкуренции многократно возрастает. Как было продемонстрировано ранее, повышение конкуренции за канал увеличивает вероятность потери сообщений.

Изменение конфигурации КС. Под изменением конфигурации будем понимать любое изменение в КС, делающее существующий маршрут передачи информации недействительным и создающее угрозу потери информации. Перечислим возможные виды изменения конфигурации КС.

1. Перемещение подвижных элементов КС. Примером является ОГ наноспутников, в результате орбитального движения постоянно меняющих взаимное положение.
2. Выход из строя узла БСС по той или иной причине. Например, в системе мониторинга космической станции узел может выйти из строя в результате механического повреждения или после исчерпания запаса энергии автономного источника питания. Такой узел более не в состоянии ни выполнять собственные измерения, ни участвовать в ретрансляции

результатов измерений других узлов; все проходящие через такой узел маршруты передачи сообщений становятся недействительными.

3. Изменение режима работы помех. Например, в системе мониторинга психофизиологического состояния космонавтов на борту космической станции помехи могут создаваться при выполнении экипажем программы экспериментов, а также другими узлами при определении их положения методом узкополосной дальнометрии [35].
4. Перемещение любых нерадиопрозрачных препятствий, изменяющее условия распространения радиосигналов, например, открытие или закрытие люков между модулями космической станции.

Все перечисленные виды изменения конфигурации требуют перестроения маршрутов передачи сообщений в БСС. Постоянное изменение конфигурации КС влечёт за собой необходимость постоянного нахождения новых маршрутов передачи сообщений в БСС.

Большой масштаб. Для многих КС характерны пространственная протяжённость в сочетании с большим количеством измерителей. Одним из примеров является рассмотренная система мониторинга торфяных пожаров. Другим примером является система мониторинга, собирающая информацию для организации технического обслуживания и ремонта авиационной и ракетно-космической техники на основе модели предиктивного обслуживания с помощью десятков и сотен тысяч датчиков [36-39]. Таким большим БСС присущи свои специфические, обусловленные масштабом проблемы. Перечислим эти проблемы и покажем причины их возникновения.

1. Увеличение количества измерений. Обслуживание более крупного объекта обычно сопровождается выполнением большего количества измерений, чем обслуживание менее крупного. Увеличенное количество результатов измерений должно быть доставлено в центр управления, что увеличивает нагрузку на канал, повышая потери данных.

2. Удлинение маршрутов. Ранее было показано, что низкая мощность трансиверов приводит к многошаговым маршрутам. С ростом масштаба объекта обслуживания повышается доля узлов, не имеющих возможности непосредственно взаимодействовать со шлюзом. Следовательно, повышается доля многошаговых маршрутов и удлиняются сами маршруты. В условиях воздействия помех потери данных при использовании длинного маршрута априори выше, чем при использовании короткого. Предотвращающая потери данных повторная передача сообщения создаёт дополнительную нагрузку на канал и приводит к необходимости удлинения активной фазы, т. е. повышает расход энергии.
3. Повышенный уровень конкуренции за канал. Наличие многошаговых маршрутов вынуждает узлы БСС пересылать не только свои собственные результаты измерений, но и принимать участие в пересылке результатов измерений других узлов. Чем ближе узел располагается к шлюзу, тем в среднем больше количество результатов измерений, проходящих через этот узел или занимающих радиоканал в его окрестности. При этом каждый ретранслируемый результат измерений загружает канал дважды: при приёме и при передаче. Следовательно, такие узлы работают в условиях повышенной конкуренции за канал. Как было показано ранее, повышение уровня конкуренции за радиоканал ведёт к росту потерь данных и задержек в передаче сообщений, что вынуждает увеличивать продолжительность активной фазы. Это приводит к повышению расхода энергии.

Таким образом, мы показали влияние на БСС таких характерных особенностей КС, как необходимость снижения потребления энергии, изменение конфигурации и большой масштаб КС.

Далее сформулируем проблемы работы БСС в составе КС.

1.3. Проблемы применения БСС в КС

Как было показано выше, под воздействием характерных особенностей КС в БСС повышаются расход энергии и потери информации. Такое снижение значений характеристик БСС свидетельствует о появлении соответствующих проблем.

Проблема расхода энергии. При анализе характерных особенностей БСС и КС было показано, что в дискретном режиме работы БСС потребление энергии определяется длительностью активной фазы. В свою очередь, необходимое значение τ определяется способом организации деятельности узла на активной фазе. Следовательно, алгоритм работы узлов БСС должен предусматривать такой способ организации деятельности, который обеспечивает снижение значения τ и выполнение ограничения по потреблению энергии. Далее проблему организации деятельности узла на активной фазе, обеспечивающей сокращение τ , будем называть *проблемой расхода энергии*. Заметим, что при использовании автономных невозобновляемых источников питания расход энергии определяет долговечность как отдельных узлов, так и БСС в целом.

Проблема надёжности. Как было показано ранее, при анализе влияния на БСС характерных особенностей КС, на возможность потерь передаваемой информации влияют изменение конфигурации КС, дискретный режим работы БСС и большой масштаб КС. Эти факторы определяют потребность в разработке специальных мер, сокращающих потери информации. Далее проблему разработки мер, сокращающих потери информации вследствие названных факторов, будем называть *проблемой повышения надёжности* или, для краткости, *проблемой надёжности*, понимая под надёжностью долю успешно доставленных в центр управления сообщений.

Таким образом, для построения на основе БСС системы коммуникации КС должны быть совместно решены проблемы расхода энергии и надёжности. Совместное с учётом особенностей БСС и КС решение обеих названных проблем определяет *метод функционирования* создаваемой БСС.

Далее определим показатели работы БСС в составе КС.

1.4. Показатели работы БСС для космических систем

Для оценки качества функционирования БСС в составе КС введём объективные показатели её работы. Для этого рассмотрим все известные из литературы показатели качества БСС, построим дерево показателей, подвергнем его анализу и выберем показатели, наиболее важные для работы в составе КС.

Масштабируемость характеризует количество взаимодействующих узлов, обеспечиваемое при линейном (в худшем случае) росте потребности в ресурсах (критическими ресурсами являются радиоканал и источник питания) [8].

Скорость доставки сообщений определяется как время, прошедшее с момента создания сообщения до момента его получения конечным адресатом, отнесённое к длине маршрута. Скорость доставки может рассматриваться как показатель оптимальности маршрута и согласованности расписания работы узлов — даже при выборе оптимального маршрута сообщение на передающем узле может ожидать включения приёмного узла [8].

Возможность использования произвольных маршрутов характеризует отсутствие ограничений на возможные связи между узлами. Узлы таких БСС способны передать сообщение любому своему соседу. Противоположностью являются БСС с иерархической маршрутизацией [34].

Готовность характеризует способность БСС к немедленной передаче информации. Высокая готовность обеспечивается постоянным прослушиванием радиоканала узлами.

Надёжность характеризует способность БСС предоставлять потребителю информацию, переданную узлами [34]. Определим надёжность БСС как отношение количества фактически доставленных в центр управления сообщений (в задаче мониторинга — результатов измерений) к количеству сообщений, которые должны быть доставлены. Надёжность БСС может изменяться с течением времени, например, вследствие изменения конфигурации обслуживаемого

объекта, изменения режима работы помех или выхода из строя отдельных узлов сети. Определённая таким образом надёжность может быть измерена как за всё время работы БСС, так и на некотором ограниченном интервале. В последнем случае мы оперируем мгновенным значением надёжности, относящимся к определённому интервалу. Если важность результатов измерения не одинакова, то им могут быть присвоены различные веса.

Долговечность характеризует обеспечение заданного периода функционирования БСС. При этом на некоторых узлах могут происходить программные и/или аппаратные сбои, некоторое количество узлов может выйти из строя навсегда, но БСС в целом должна выполнять свои функции [8]. Долговечность БСС связана с долговечностью отдельных узлов, но эти величины не тождественны. Некоторые узлы исчерпывают запас энергии своего ИП раньше других. По мере исчерпания запаса энергии ИП узлы выходят из строя, что сокращает количество доставленных в центр управления сообщений и, следовательно, снижает надёжность. Определим долговечность БСС как длительность функционирования, в течение которой текущий состав узлов обеспечивает надёжность не хуже минимально допустимой. Очевидно, что чем большей начальной избыточностью обладала БСС, тем выше будет её долговечность.

Расход энергии. Определим расход энергии как величину энергии, израсходованную узлом с начала работы БСС. Узлы БСС могут расходовать энергию по-разному, поэтому введём в рассмотрение *средний расход энергии*. Скорость расходования узлом БСС энергии автономного невозобновляемого ИП очевидным образом определяет его долговечность.

Различные показатели работы БСС связаны между собой, рис. 1.7.

Чем лучше масштабируемость БСС, тем выше её надёжность и ниже расход энергии при обслуживании большого числа узлов; при небольшом их числе избыточное значение масштабируемости повышает расход энергии. Чем выше готовность БСС, тем больше энергии расходуется на её поддержание.

Возможность использования произвольных маршрутов требует передачи вспомогательных сообщений, увеличивая расход энергии, или снижает скорость доставки сообщений. Информация доставленного с задержкой сообщения теряет актуальность, что приводит к снижению надёжности.



Рис. 1.7. Дерево показателей работы БСС

Во всех рассмотренных задачах (связь внутри ОГ наноспутников, мониторинг на борту КА, создание производных продуктов на основе ЕТРИС ДЗЗ) критически важны значения таких характеристик БСС как величина расхода энергии и надёжность. Значения масштабируемости и скорости доставки сообщений являются второстепенными, так как неадекватные значения этих показателей учитываются через расход энергии и надёжность, ухудшая их значения. Менее важны при работе БСС в составе КС возможности использования произвольных маршрутов передачи данных и постоянной готовности БСС, так как связь осуществляется по расписанию сеансов.

Поэтому для оценки качества работы БСС в составе КС должны использоваться показатели расхода энергии и надёжности.

При оценке качества работы БСС на длительном отрезке времени мы будем задавать минимально допустимую надёжность и определять долговечность БСС. При оценке качества работы БСС на кратком отрезке времени (от одного до нескольких периодов работы) будем использовать надёжность, а в качестве дополнительного показателя — средний расход энергии узлами за один период работы БСС.

Оценивать качество работы БСС, перед которой ставится задача минимизации расхода энергии, мы будем с использованием среднего расхода энергии её узлами при выполнении ограничения на надёжность.

Теперь проанализируем известные подходы к созданию БСС, обращая внимание на решение в рамках этих подходов сформулированных проблем применения БСС в КС — проблемы расхода энергии и проблемы надёжности.

1.5. Анализ известных подходов к созданию БСС

1.5.1. Mobile Ad Hoc Network

Существует особый класс беспроводных самоорганизующихся сетей подвижных объектов — Mobile Ad Hoc Network (MANET) [34]. Однако этот класс ориентирован на работу в условиях отсутствия дефицита энергии: библиографическая база данных Scopus при поиске по ключевому слову *MANET* находит 16991 публикацию, в то время как при поиске по сочетанию ключевых слов *MANET duty cycle*, обозначающему дискретные сети MANET, — только 13 (количество результатов поиска приведено по состоянию на 31 августа 2022 года). Рассматриваемые в публикациях [40-44] о дискретных MANET подходы ориентированы на передачу данных между произвольными отправителями и получателями и высокую степень готовности. Это не позволяет решить проблему расхода энергии (например, в работе [40] обсуждаются значения коэффициента снижения расхода энергии k , не превышающие 4, что многократно ниже

практических потребностей КС). Поэтому класс MANET для создания на его основе систем коммуникаций КС не подходит.

Другие известные методы функционирования БСС рассмотрены далее.

1.5.2. Sensor MAC

Для организации множественного доступа к каналу в дискретном режиме в развитие протокола MACA [45] был предложен протокол Sensor MAC (S-MAC) [5]. S-MAC основан на идеях работы узлов по расписанию и предварительного согласования передачи данных при помощи пары сообщений — запроса на передачу (Ready To Send, RTS) и разрешения передачи (Clear To Send, CTS). После получения разрешения CTS в ответ на запрос RTS узел передаёт сообщение с данными (DATA), в ответ на которое ему должно поступить подтверждение успешного приёма (ACK).

Будем рассматривать случай расписания с совпадающими для всех узлов длительностями τ и T . Расписания узлов различаются лишь моментом перехода в состояние сна. Этот случай несложно обобщить для сетей, допускающих индивидуальные расписания работы узлов.

После начала своей работы узел некоторое установленное время ожидает приёма расписания работы от соседей. Если узел расписания работы не получил, он случайным образом создаёт собственное расписание и широковещательным сообщением SYNC информирует все окружающие узлы, что он перейдёт в сон через t секунд. Если в конкретной сети допускаются индивидуальные расписания работы узлов, сообщение SYNC кроме t должно содержать τ и T действующего на узле расписания.

Если узел успел получить расписание работы соседа (сообщение SYNC с параметром t) до создания собственного, то он принимает его. Узел ожидает случайный интервал времени t_d , а затем ретранслирует расписание сообщением SYNC, сообщая, что он перейдёт в сон через $t - t_d$ секунд. Случайная задержка позволяет снизить вероятность коллизий в случае, если расписание было принято

и другими узлами. Заметим, что принятие и ретрансляция чужого расписания являются проявлением положительной обратной связи.

Если узел получает расписание соседа после выбора и трансляции своего собственного, он принимает оба расписания. Это значит, что он будет просыпаться и по своему расписанию, и по расписанию соседа. Перед переходом в сон узел транслирует собственное расписание. Синхронизация работы узлов обеспечивается тем, что в сообщениях SYNC момент перехода узла в сон t задаётся не абсолютным, а относительным значением.

Передача сообщения по многошаговому маршруту показана на рис. 1.8.

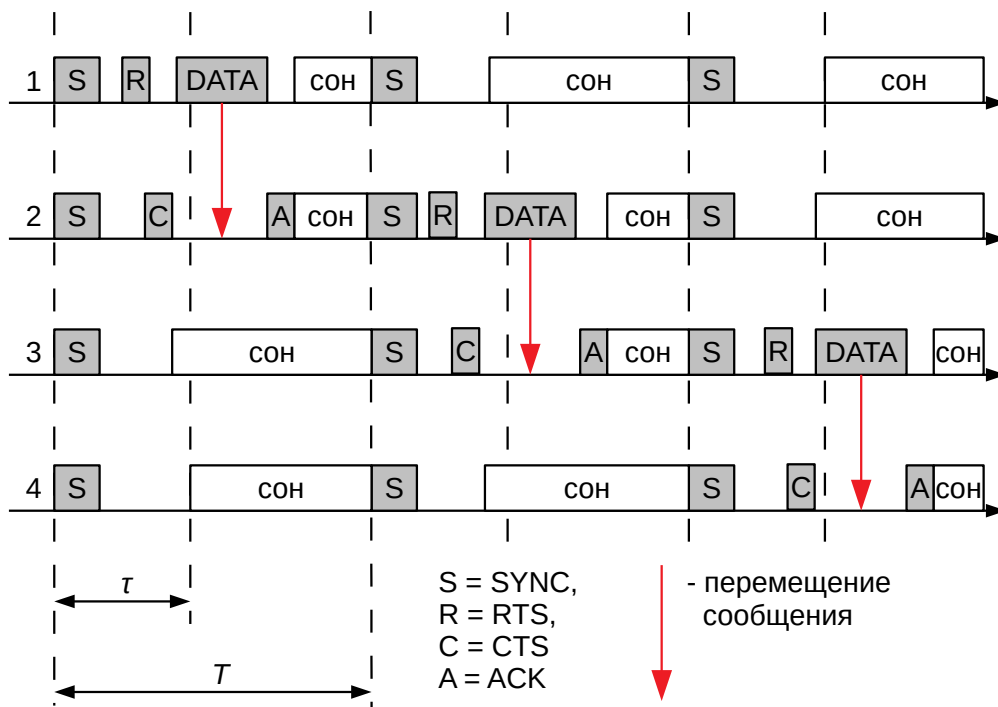


Рис. 1.8. S-MAC: передача сообщения по многошаговому маршруту

Интервал работы узла состоит из двух частей. Первая предназначена для получения сообщений SYNC, вторая — для сообщений RTS/CTS. Каждая из этих частей разбита на большое количество интервалов, предназначенных для прослушивания канала. Сообщения SYNC и RTS передаются с предварительным прослушиванием канала, т. е. только после того, как узел убедится в том, что

канал свободен в течение целого интервала. Прослушивание канала подразделяется на физическое (анализ уровня принимаемого сигнала трансивером в течение всего выбранного интервала) и виртуальное (проверка, закончились ли указанные в ранее принятых сообщениях RTS/CTS интервалы времени, зарезервированные для передачи сообщений). Если у некоторого узла появляются данные для передачи другому узлу, он во время активности второго узла выбирает случайным образом интервал прослушивания канала и выполняет виртуальное и физическое прослушивание. Если обе проверки завершились успешно, узел начинает передачу RTS.

Для сокращения расхода энергии узлы, приняв RTS или CTS, и поняв, что сообщение с данными (более длинное, чем RTS/CTS) адресовано не им, не просто хранят молчание, а переходят в состояние сна. Время передачи последовательности сообщений RTS-CTS-DATA-ACK может выйти за границу периода активности, в этом случае отправитель и получатель перейдут в режим сна по окончании передачи.

Протокол S-MAC вносит значительные задержки при передаче сообщений по многошаговым маршрутам — за один период активности сообщение проходит только один шаг маршрута (рис. 1.8), что исключает своевременное поступление результатов, существенно снижая надёжность БСС. В работе [46] этот недостаток был частично устранён. Для этого по окончании передачи данных на всех участвующих в ней узлах, которые были об этом уведомлены при помощи RTS/CTS, добавляется дополнительный период активности, позволяющий передать сообщение на следующий в многошаговом маршруте узел. В работе [47] предложены адаптивные периоды активности. Однако это не в полной мере решает сформулированную проблему надёжности.

Дополнительные сообщения RTS/CTS снижают пропускную способность канала, вынуждая увеличивать длительность активных фаз, что усугубляет проблему расхода энергии.

Отмеченные недостатки делают S-MAC и его последующие модификации непригодными для передачи большого количества сообщений по многошаговым маршрутам, характерным для КС.

1.5.3. Self-organizing Sensor Network

Протокол Self-organizing Sensor Network (SFSN) [14, 15], развивая идеи S-MAC, совмещает протокол множественного доступа к каналу с алгоритмом самоорганизации. Каждому узлу соответствует свой ограниченный набор соседей. Работа сети разбивается на последовательные эпохи, каждая из которых состоит из фазы самоорганизации и нескольких рабочих фаз. Фаза самоорганизации предназначена для создания расписания работы узлов. Во время рабочих фаз сеть работает по созданному расписанию. Длительность эпохи устанавливается при разработке в зависимости от подвижности узлов и других факторов и может колебаться в широких пределах. Фазы самоорганизации и рабочие фазы состоят из интервалов. Интервалы фазы самоорганизации разбиты на большое (порядка 1000) число микроинтервалов. При переходе к новому микроинтервалу узлы по известной им последовательности меняют частотный канал.

Первым на фазе самоорганизации начинает работать шлюз, присваивая себе порядковый номер 1. Он передаёт приглашение другим узлам на подключение к сети. Эти узлы, приняв приглашение, отвечают на него. При этом могут произойти коллизии, разрешаемые с помощью модифицированного алгоритма CRA (Collision Resolution Algorithm) [48]. Узел, выбранный в результате работы CRA, присваивает себе очередной порядковый номер и отвечает на приглашение. После ответа оба узла, отправивший приглашение и ответивший, включают друг друга в свой набор соседей и запоминают номер интервала, который будет использован для связи с этим соседом на рабочих фазах. После этого вновь подключенный узел передаёт приглашение на подключение к сети. Перечисленные выше действия повторяются заданное количество раз, после чего фаза самоорганизации завершается. Результатом фазы самоорганизации является формирование на узлах

расписания работы сети — перечня интервалов, когда узел может передать сообщения своим соседям и когда он должен принимать сообщения от своих соседей.

Адаптированный авторами SFSN алгоритм CRA предусматривает отправку запроса во время первого микроинтервала. Для ответов предназначены следующие нечётные микроинтервалы. Прослушивающий канал инициатор запроса сообщает во время чётного микроинтервала, была ли коллизия. Если коллизия произошла, отвечавшие узлы с некоторой вероятностью временно отказываются от конкуренции, и в следующем нечётном микроинтервале конкурентов будет меньше. Так продолжается до тех пор, пока какой-либо узел не останется один, и тем самым выиграет конкуренцию за канал. Если случится так, что все узлы отказались от конкуренции, и на очередном нечётном микроинтервале никто не передал ответа, узлы вновь включаются в конкуренцию.

На рабочих фазах узлы взаимодействуют друг с другом в порядке, обратном тому, в котором они были подключены к сети на фазе самоорганизации. Например, первый подключенный к сети узел будет передавать сообщение шлюзу на рабочей фазе последним. На рабочих фазах каждый узел уже имеет расписание работы, поэтому коллизии не возникают. Это позволяет избежать использования алгоритма CRA и предусмотренной стандартом IEEE 802.15.4 схемы множественного доступа CSMA/CA.

Однако SFSN способен эффективно управлять работой БСС не во всех случаях.

1. Протокол SFSN, установив очерёдность передачи узлами сообщений, позволяет сети работать без режима конкурентного доступа на рабочих фазах, что ускоряет передачу сообщений, повышает надёжность и снижает расход энергии. Однако эти преимущества проявляются только в случаях, когда фазы самоорганизации редки. В случае обслуживания КС, относящихся к объектам изменяемой конфигурации, созданное расписание работы должно быть использовано немедленно, иначе оно успеет устареть

вследствие изменения расположения узлов, помех и препятствий, что приведёт к снижению надёжности.

2. Вновь включающийся в работу сети (или пропустивший по каким-либо причинам фазу самоорганизации) узел вынужден простаивать до начала следующей фазы самоорганизации, в результате которой он определит своё место во временной структуре взаимодействия. Отсутствие информации с такого узла снижает надёжность БСС.
3. SFSN не способен противостоять нестационарным помехам. Если помеха проявила себя на фазе самоорганизации, она будет учтена. Но если помеха начала работу после фазы самоорганизации, то передачи узлов сети, не прослушивающих канал перед началом собственной передачи согласно схеме CSMA/CA, и ограниченных созданным до начала работы помехи расписанием, окажутся подвергнуты воздействию помехи. Так будет продолжаться до следующей фазы самоорганизации, что снижает надёжность.

Таким образом, метод SFSN не может быть использован для управления работой БСС, обслуживающих КС.

1.5.4. Методы с использованием логических адресов

Стандарт IEEE 802.15.4 предусматривает наличие у узлов БСС двух видов адресов [28]:

- физический адрес, представляющий собой 64-разрядное двоичное число, поставляемый узлу входящей в его состав специальной микросхемой (например, DS2411R компании Maxim Integrated [49], в постоянной памяти которой хранится уникальное 64-битное значение), не изменяющийся в течение всего времени существования узла от изготовления до утилизации;
- логический адрес, представляющий собой 16-разрядное двоичное число, назначаемый узлу при его подключении к действующей сети.

В зависимости от того, адреса какого типа используются в методе организации работы БСС, можно разделить все методы на методы с использованием логических адресов и методы с использованием физических адресов.

После появления спецификации альянса ZigBee многие производители совместимого с этой спецификацией оборудования и программного обеспечения выпускают реализации стека протоколов ZigBee. Заголовок сетевого уровня ZigBee предусматривает использование логических адресов [50]. Во время подключения нового узла к существующей сети координатор сети (или иной уполномоченный узел) назначает новому узлу логический адрес. Подключённые к сети узлы взаимодействуют с другими узлами с использованием логического адреса. При стационарности объекта обслуживания это приносит несколько преимуществ. Например, использование логических адресов может упрощать маршрутизацию сообщений с произвольным адресатом [51]. Кроме того, более короткая адресная информация сокращает размер сообщений, что повышает надёжность БСС.

Однако маршрутизация с использованием логических адресов не обладает динамизмом, требующимся при обслуживании космических систем. Покажем это.

Логические адреса могут назначаться узлам статически и динамически. При статическом способе назначение адреса происходит однократно. Это приводит к тому, что переместившийся узел, хранящий в памяти адреса родителя и потомков в топологии, не сможет взаимодействовать с новыми соседями. Маршруты передачи сообщений, проходящие через этот узел, станут недействительными. Следовательно, переместившийся узел оказывается логически изолированным, а БСС в целом может потерять связность. Это неприемлемо.

При динамическом способе назначение логических адресов должно выполняться в начале каждой активной фазы. Эта процедура — рекурсивная. В её начале логические адреса назначаются непосредственным потомкам координатора. Затем эта процедура повторяется только что подключёнными к сети

узлами. Назначение логических адресов всем узлам сети занимает длительное время, что противоречит требованию сокращения длительности активных фаз, вытекающему из необходимости решения проблемы расхода энергии. Таким образом, использование в БСС логических адресов для обслуживания космической системы неприемлемо.

1.5.5. Методы с использованием физических адресов

В работе [52] рассмотрен метод функционирования дискретной БСС объектов обслуживания изменяемой конфигурации, использующий физические адреса узлов. Данный метод содержит протоколы распространения по сети команд на выполнение измерений, передачи результатов измерений в центр управления, а также способ синхронизации шкал времени узлов на основе фактических величин задержки доступа к каналу. В начале активной фазы по сети распространяется команда на выполнение измерений. Первым эту команду передаёт в широковещательном режиме шлюз. Получив эту команду, узлы запоминают адрес отправителя и ретранслируют команду на выполнение измерений далее, также в широковещательном режиме, применяя схему доступа к каналу в режиме конкуренции. Таким образом, каждый узел сети получает команду и, что важно, фиксирует в своей памяти адрес узла, от которого он эту команду получил (родителя в топологии). Иными словами, распространение в сети команды на выполнение измерений сопровождается построением древовидной структуры взаимодействия узлов, рис. 1.9. Узлы, не получившие на некоторой активной фазе команды на измерения, в дальнейшей работе на этой активной фазе не участвуют.

Получившие команду на измерения узлы выполняют измерения и передают их результаты в адресном режиме своему родителю в топологии — тому узлу, чей адрес был зафиксирован в их памяти при получении команды на выполнение измерений. Узлы, получившие адресованные им сообщения с результатами измерения, принимают их и ретранслируют уже своему родителю. Таким образом

обеспечивается передача результатов измерений от всех узлов сети, получивших команду на измерение, шлюзу для последующей передачи в центр управления.

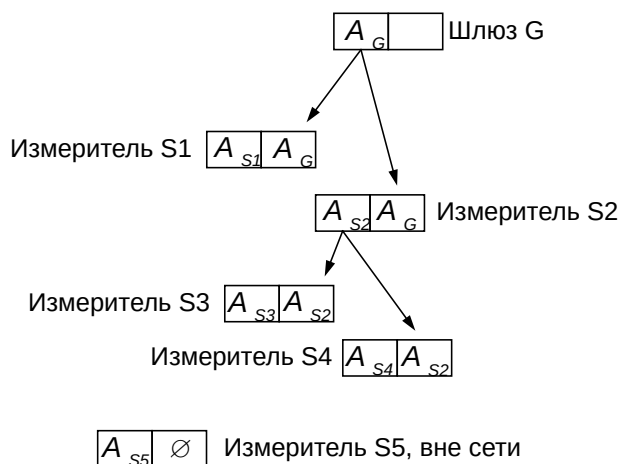


Рис. 1.9. Распределённая структура взаимодействия узлов БСС

Предотвращение накопления отклонений шкал времени узлов друг от друга, делающих невозможной передачу сообщений между ними (см. рис. 1.6), основано на следующих положениях.

1. Эталоном в БСС считаются часы шлюза.
2. Для синхронизации шкал времени узлов используются сообщения, содержащие команды на выполнение измерений. Для этого в них предусмотрено поле, содержащее эталонное время. Приняв это сообщение, узлы загружают в свои часы принятое значение времени.
3. Фактическая величина задержки доступа к каналу при ретрансляции команд на выполнение измерений определяется как интервал времени, прошедший между сохранением в памяти показания часов и началом фактической ретрансляции сообщения.
4. Фактическая величина задержки дополнительным сообщением отправляется потомкам в дереве, позволяя им внести поправку в ранее полученное значение эталонного времени и узнать текущее значение

эталонного времени. Приняв дополнительное сообщение, узлы увеличивают показания своих часов на величину поступившей задержки.

Однако для БСС, использующих рассматриваемый метод функционирования, характерны значительная конкуренция между узлами за канал при ретрансляции результатов измерений (ранее было показано, что высокая конкуренция за канал ухудшает показатели работы БСС) и неравномерность распределения сообщений в пределах активной фазы.

Причиной значительной конкуренции при ретрансляции измерений являются многошаговые маршруты и передача по ним каждого из результатов измерений в отдельности. В некоторых случаях при низком качестве связи происходит повторная отправка сообщений, что ещё сильнее загружает канал, повышая конкуренцию между узлами. Увеличивает нагрузку на сеть и передача дополнительных сообщений с фактической величиной задержки.

Неравномерность распределения сообщений в пределах активной фазы вызвана тем, что синхронизация обеспечивает практически одновременный переход узлов из фазы сна в активную фазу, а моменты поступления сообщений синхронизации в общем случае различаются: первыми синхронизируются узлы, расположенные ближе к корню древовидной структуры, которым является шлюз, последними синхронизируются измерители, являющиеся листьями этого дерева. Получив и ретранслировав сетевую информацию, измерители выжидают некоторую паузу, необходимую для окончания распространения сетевой информации в области их расположения, рис. 1.10.

Затем узлы отправляют результаты собственных измерений. Если некоторый узел ретранслирует результаты измерений других узлов, то между синхронизацией (и связанным с ней обменом сообщениями) и ретрансляцией чужих результатов измерений проходит некоторое время, которое этот узел проводит в ожидании поступления сообщений. Эта пауза тем дольше, чем ближе узел к корню дерева (рис. 1.10а). Для узлов, расположенных ближе к листьям дерева, эта пауза невелика, но по окончании ретрансляции такие узлы

простаивают до конца активной фазы (рис. 1.10б), однако, соблюдая единое расписание работы, в фазу сна не переходят, бесполезно расходуя энергию.

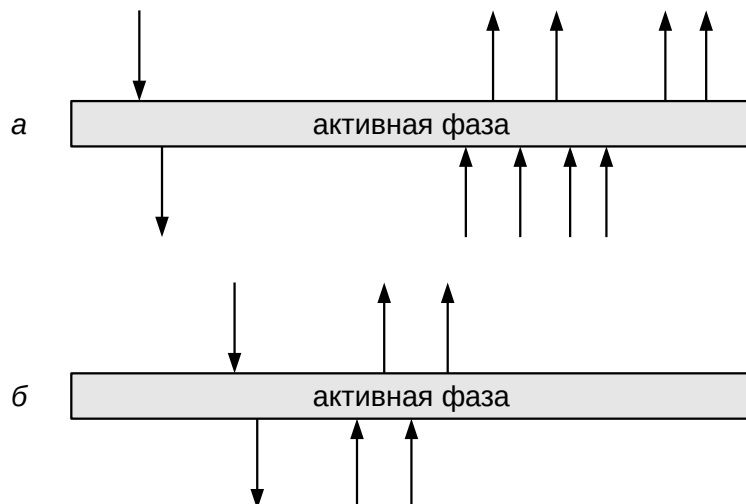


Рис. 1.10. Расположение приёма и передачи сообщений на активных фазах: а - узел ближе к корню дерева, б - ближе к листьям

Таким образом, метод функционирования БСС, изложенный в [52], не решает проблемы надёжности и расхода энергии в достаточной для обслуживания космических систем степени.

1.6. Класс БСС для космических систем

На основании анализа потребностей космических систем (раздел 1.1) и возможностей БСС может быть сделан вывод о том, **использование БСС в КС добавляет последним новые возможности и потому целесообразно.**

В результате анализа характерных особенностей БСС в составе КС (раздел 1.2) сформулированы проблемы применения БСС в КС — **проблема расхода энергии и проблема надёжности** (раздел 1.3). Поэтому среди множества известных показателей работы БСС (раздел 1.4) при их работе в составе КС должны использоваться **величина расхода энергии и надёжность.**

Результатом анализа известных методов функционирования БСС (раздел Error: Reference source not found) является вывод о том, что известные методы функционирования не обеспечивают потребностей и **для обслуживания КС необходимо разработать новый класс БСС.**

Метод функционирования нового класса БСС, который в дальнейшем будет называться классом **БСС для космических систем**, должен обеспечивать совместное достижение требуемых значений показателей расхода энергии и надёжности. Расход энергии и надёжность являются показателями работы БСС для космических систем. Отличительной особенностью класса БСС для КС от известных классов БСС является то, что требуемые значения показателей расхода энергии и надёжности должны обеспечиваться за счёт отказа от возможности использования произвольных маршрутов передачи сообщений и от высокой готовности БСС.

В обеспечение проектирования БСС для КС должны быть разработаны его модельно-алгоритмическое обеспечение, методика проектирования и необходимые инструментальные средства.

В первой главе работы проанализировано состояние исследований в области организации коммуникаций в космических системах с использованием БСС. На ряде практических задач показано, что использование БСС в космических системах позволяет решить важную научно-техническую проблему — расширить функциональные возможности космических систем. Поэтому целесообразно использование БСС в космических системах для организации коммуникаций в компактных группировках спутников, для организации мониторинга в наземном и бортовом сегментах. На основе анализа характерных особенностей БСС и космических систем сформулированы проблемы использования БСС в КС: проблема расхода энергии и проблема надёжности. Для контроля решения этих проблем в качестве основных показателей работы БСС для космических систем выбраны расход энергии и надёжность. Рассмотрены известные методы

функционирования БСС, в той или иной степени решающие эти проблемы. Сделан вывод о необходимости разработки нового класса БСС, решающего сформулированные проблемы с учётом особенностей КС и обеспечивающего достижение требуемых значений показателей надёжности и расхода энергии, его модельно-алгоритмического обеспечения, а также методики структурно-параметрического синтеза БСС нового класса.

Глава 2. Положения, определяющие класс БСС для космических систем

В предыдущей главе был сделан вывод о необходимости разработки класса БСС для космических систем. В настоящей главе представлены основные положения, определяющие этот класс БСС.

2.1. Древоподобная структура взаимодействия

Как было показано ранее, при обслуживании КС, являющейся объектом изменяемой конфигурации, БСС должна использовать актуальные маршруты передачи сообщений. Чтобы учесть возможное изменение конфигурации КС, произошедшее за время сна, дискретная БСС должна формировать актуальные маршруты передачи сообщений в начале каждой активной фазы.

Формирование маршрутов передачи сообщений может быть выполнено только в результате взаимодействия узлов. Этой цели служит широкоэмиттерное распространение сообщения с сетевой информацией в начале каждой активной фазы. При передаче этого сообщения используется схема множественного доступа к каналу CSMA/CA. Первым сетевую информацию отправляет шлюз.

Получив сетевую информацию, узел синхронизирует свои часы с эталоном (см. раздел 2.5) и запоминает адрес узла, от которого он принял это сообщение, в качестве своего родителя в древоподобной топологии сети. Затем узел ретранслирует сетевую информацию, внося необходимые изменения в некоторые её поля, например, обновив поле эталонного значения времени. В одном периоде работы БСС сетевая информация может быть ретранслирована узлом только один раз.

Запомненный узлом адрес родителя будет использован в текущем периоде работы БСС для передачи сообщений с собственными результатами измерений и ретрансляции результатов измерений других узлов.

Таким образом, по окончании распространения сетевой информации на каждом узле, находящемся в области досягаемости сети, становится известен адрес родителя в древовидной топологии сети, через который этот узел будет передавать свои и ретранслировать чужие сообщения, адресованные шлюзу. Совокупность пар, состоящих из собственного адреса узла и адреса его родителя, образует распределённую структуру взаимодействия узлов, рис. 2.1.

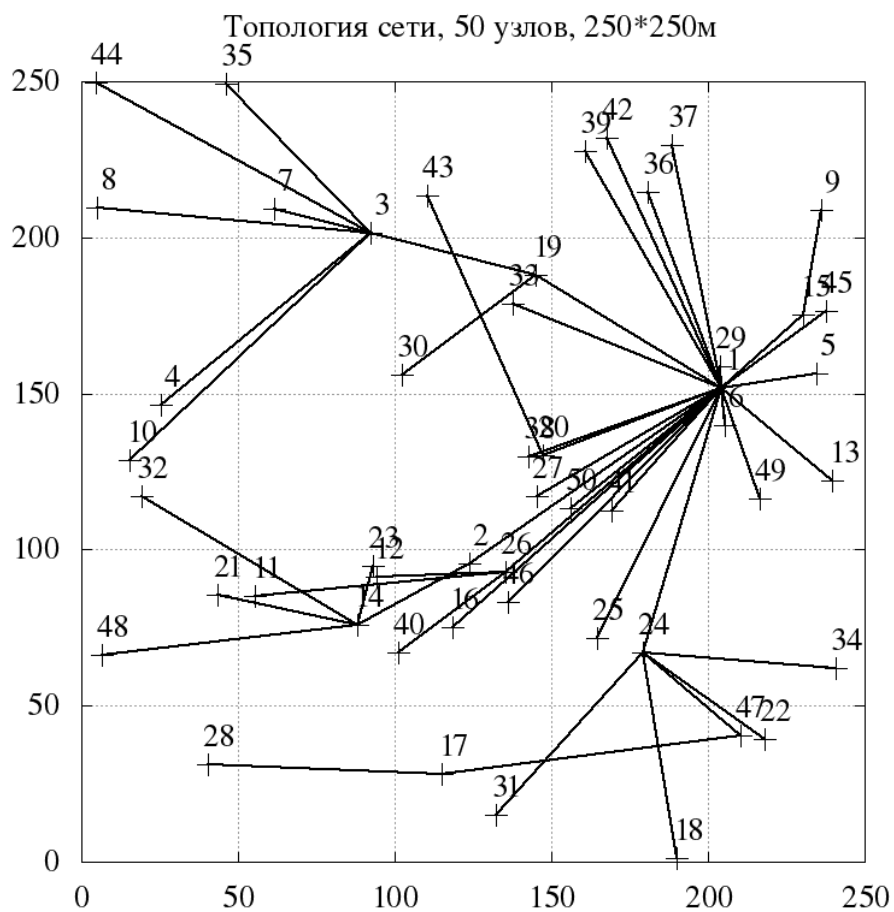


Рис. 2.1. Древовидная топология БСС

Если на некотором периоде работы узел не получил служебного сообщения, то он вынужден пропустить этот период, так как результат своих измерений ему отправить некому.

Отметим, что формирование структуры взаимодействия путём ретрансляции сообщения синхронизации получившими его узлами есть пример возбуждения

(положительной обратной связи), являющегося одним из механизмов самоорганизации [53].

Использование древовидной структуры взаимодействия сужает область применения использующей это положение БСС до решения задач мониторинга и иерархических коммуникаций в КС.

2.2. Использование физических адресов

Стандартом IEEE 802.15.4 предусмотрено наличие у узла БСС двух видов адресов — встроенных физических и назначаемых логических [28]. Физическими 64-разрядными адресами узлы БСС обеспечиваются при их производстве. Для этого в состав узлов вводится специальная микросхема, представляющая собой постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), хранящее уникальное значение [49]. Уникальность значений гарантируется производителем микросхем: в ПЗУ на этапе производства лучом лазера, подачей большого тока или иным способом пережигается уникальный набор перемычек, определяющий двоичное значение. В последующем это значение не быть может изменено. Считав это значение при инициализации программы, узел БСС запоминает и принимает его в качестве физического адреса.

Логические адреса представляют собой 16-разрядные значения и назначаются узлам при их подключении к сети.

Вследствие того, что 1) использование физических адресов позволяет избежать затрат времени на получение логического адреса и 2) необходимо идентифицировать источник измерений, в разрабатываемом классе БСС используются физические адреса. Рассмотрим названные причины подробнее.

Затраты времени на получение логических адресов. В начале работы БСС лишь один узел обладает действительным значением логического адреса — координатор. Остальные узлы подключаются к сети при помощи запросов к каналному уровню стека протоколов MLME-ASSOCIATE.request. В результате обработки этого запроса узел передаёт по радио пакет, содержащий команду на

подключение к сети. При этом узел идентифицирует себя физическим адресом. В ответном сообщении координатор сети или иной уполномоченный узел сообщает назначенный узлу логический адрес. Канальный уровень оповещает вышележащий уровень (сетевой или прикладной) событием MLME-ASSOCIATE.confirm, параметр AssocShortAddress которого содержит назначенный узлу логический адрес. Взаимодействие сетевого и канального уровней стека протоколов двух узлов БСС — подключающегося к сети и уже подключённого — показано на рис. 2.2.

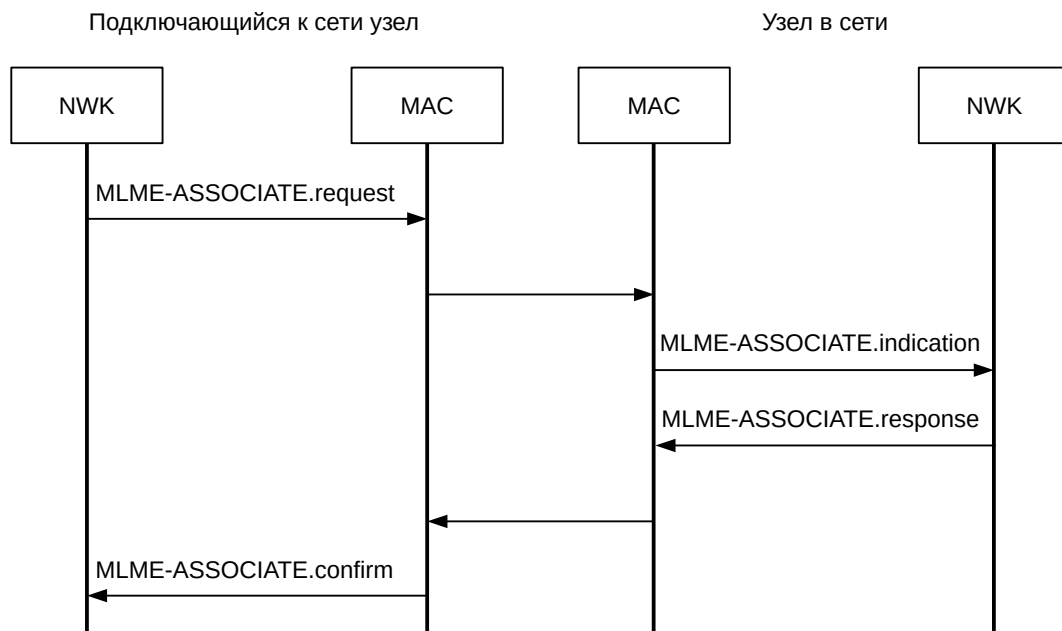


Рис. 2.2. Взаимодействие сетевого (NWK) и канального (MAC) уровней стека протоколов при подключении узла к сети

Нестационарный характер космической системы, проявляющийся в подвижности (пространственной и временной) её элементов, приводит к тому, что ранее существовавшие связи между узлами и маршруты передачи сообщений становятся недействительными. Поэтому подключение всех измерителей к дискретной БСС должно выполняться на каждой активной фазе заново. Подключение узлов к сети происходит в результате взаимодействия между ними,

и потому требует определённого времени. Это время увеличивает длительность активной фазы дискретной БСС, повышая расход энергии, что неприемлемо.

Необходимость идентификации источника измерений. Узлы БСС могут быть оснащены различающимися наборами датчиков, результаты измерений которых передаются в виде массива байтов. Например, одна часть этого массива может представлять собой целочисленные значения, другая — вещественные. Разрядность результатов также может различаться. Места установки узлов в пределах объекта обслуживания могут быть таковы, что одно и то же значение физической величины имеет различный смысл. Например, высокое значение температуры некоторого внешнего элемента космической станции может объясняться нагревом солнечным светом и потому быть допустимым, а во внутреннем обитаемом пространстве это же значение может быть неприемлемым. Поэтому поступающие в центр управления результаты измерений должны быть правильно интерпретированы. Для корректной интерпретации результатов центру управления необходимо владеть информацией об источнике измерения. Такая информация может быть предоставлена путём снабжения результатов измерений метаданными об измеряемых величинах, диапазонах значений, месте установки узла и т. д. Эти метаданные не изменяются в течение жизненного цикла узла БСС, но их передача дополнительно загружает радиоканал. Поэтому вместо использования метаданных рациональнее идентифицировать узлы в целом уникальными номерами. В центре управления в этом случае необходимо иметь для каждого из узлов дескриптор, позволяющий правильно интерпретировать поступивший от него массив байтов. В роли идентификатора узла можно использовать его физический адрес.

Таким образом, использование физических адресов позволяет не только избежать длительного процесса подключения узлов к сети, но и идентифицировать измерители, позволяя центру управления правильно интерпретировать результаты их работы.

2.3. Обновление адреса родителя

Вследствие конкурентного доступа к каналу очередность ретрансляции узлами сообщений с сетевой информацией случайна. Поэтому первым некоторому узлу может поступить сообщение, отправленное физически отдалённым узлом. Характерное для беспроводной связи затухание сигналов при большом расстоянии между узлами снижает мощность принимаемого сигнала, что при передаче результатов измерений в условиях воздействия помех может стать источником потери данных. Возникновение такой ситуации показано на рис. 2.3. Сетевую информацию от узла **A** приняли два узла, **B** и **C**. Пусть в результате конкуренции узел **C** первым получил доступ к каналу и ретранслировал сетевую информацию, которую принял узел **D**. Затем доступ к каналу получил узел **B** и узел **D** принимает его сообщение. Качество связи между узлами **B** и **D** выше, чем между **C** и **D**, но узел **D** уже выбрал для себя родителя — узел **C**, хотя этот выбор не рационален.

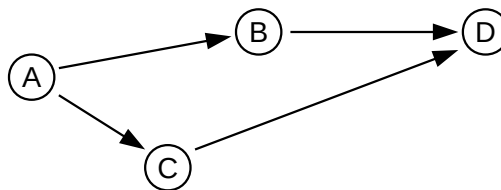


Рис. 2.3. Неоднозначность при выборе родителя

Причиной нерационального выбора родителя является то, что выбор был сделан при поступлении первого же предложения. Следствием нерационального выбора родителя может стать потеря данных при передаче сообщений. Для устранения таких ошибок потребуется повторная передача сообщений, что приведёт к увеличению длительности активной фазы. Если повторная передача сообщений не устранит ошибку, то это отрицательно скажется на надёжности БСС.

С другой стороны, долгое ожидание узлом поступления дополнительных сообщений с сетевой информацией также не рационально из-за вызванной этим ожиданием задержки ретрансляции сетевой информации. При этом длительность активной фазы возрастает на величину ожидания, повторённую для каждого из шагов многошагового маршрута. Например, задержка в 50 мс на каждом из 20 шагов маршрута приведёт к общему увеличению длительности активной фазы на 1 с, что может существенно повысить расход энергии.

Это противоречие в предложенном классе дискретных БСС разрешается следующим механизмом, опирающимся на глубину узла в топологии. Определим *глубину* некоторого узла как количество шагов передачи сообщения от данного узла до шлюза. Если некоторый узел расположен в сети на глубине k , то его потомки располагаются на глубине $k+1$.

1. В теле сообщения с сетевой информацией присутствуют поля глубины узла, отправившего сообщение, и качества связи со шлюзом. Значение глубины при передаче сообщения шлюзом равно 0; при каждой ретрансляции значение увеличивается на 1. Качество связи со шлюзом — шлюз передаёт значение 1.0; при ретрансляции узел обновляет это значение, умножая его на качество связи со своим родителем. Качество связи между парой узлов определяется как вероятность безошибочной передачи сообщений между ними. Для численной оценки качества связи используется предоставляемое трансивером при приёме сообщения значение Link Quality Indicator (LQI) [28, 29].
2. Получивший первое предложение о подключении к сети узел: 1) принимает это предложение, 2) вычисляет и запоминает свои значения глубины и качества связи со шлюзом, 3) инициирует ретрансляцию сообщения с обновлённой сетевой информацией, 4) начинает отсчёт интервала ожидания альтернативных предложений.
3. При поступлении альтернативного предложения во время одноимённого интервала узел вычисляет альтернативные значения глубины и качества

связи со шлюзом. Затем альтернативные значения сравниваются с текущими. Если глубина в альтернативном предложении не хуже текущей глубины, а качество связи со шлюзом у альтернативного предложения выше, чем у текущего, то обновляются адрес родителя, глубина и качество связи со шлюзом. Если сообщение с сетевой информацией ещё не было отправлено, в его тело заносятся новые значения полей. Если сетевая информация уже была ретранслирована, то новое сообщение не отправляется.

4. Альтернативные предложения, поступившие после окончания интервала их ожидания, не рассматриваются.

Требование того, чтобы глубина в альтернативном предложении была не хуже текущей глубины узла, обусловлено необходимостью предотвращения петель в маршрутах. Петли могут появляться в связи с тем, что узел ретранслирует сетевую информацию, не дожидаясь окончания интервала поступления альтернативных предложений. Без проверки глубины узел мог бы выбрать альтернативное предложение, исходящее от собственного потомка. Это привело бы к возникновению бесконечных циклов в маршрутах передачи сообщений, а в конечном счёте к тому, что ни один из результатов измерений, маршрут которых проходит через такой узел, не был бы доставлен в центр управления.

Длительность интервала ожидания альтернативных предложений является одним из параметров рассматриваемого класса БСС.

2.4. Дискретный режим работы

Работа БСС организуется в дискретном режиме, для которого характерно наличие периодов работы, состоящих из активных фаз и фаз сна. На активных фазах узлы выполняют измерения, принимают и передают сообщения. Для этого компоненты узлов используют в полной мере энергию ИП. Фазы сна, характеризующиеся практически полным отсутствием потребления энергии ИП, вводятся для снижения расхода энергии узлами.

Покажем, как дискретный режим работы узлов БСС влияет на расход энергии. Основными потребителями энергии в составе узлов БСС являются микропроцессор, трансивер и датчики. Особенностью применяемых в узлах БСС электронных компонентов является наличие нескольких режимов работы, различающихся величиной потребления энергии. Характеристики типичных для узлов БСС компонентов приведены в таблице 2.1. Рассмотрим узел БСС в составе микропроцессора MSP430F5438A, трансивера CC2520, датчика SHT10. Пренебрегая потреблением тока вспомогательными компонентами и полагая, что трансивер находится в состоянии приёма, можно определить ток потребления такого узла в активном режиме. Он составит около 32 мА. Пусть располагаемый³ запас энергии автономного ИП составляет 2000 мА·ч. Запас энергии такого ИП будет исчерпан рассматриваемым узлом менее чем за 63 часа.

При организации дискретного режима работы срок функционирования узла БСС от того же самого ИП может быть значительно увеличен. Например, если на однократное выполнение своих функций узлу требуется 1 с, а периодичность выполнения этих функций составляет 300 с, может быть организован дискретный режим работы с длительностью активной фазы, равной 1 с, и длительностью фазы сна, равной 299 с. В этом случае от того же самого ИП узел сможет функционировать более 18000 часов.

Значительно снижая расход энергии, дискретный режим работы несколько сужает область применения использующих его БСС. Дискретные БСС не могут использоваться для решения задач, требующих постоянной готовности узлов к выполнению каких-либо действий.

Класс задач, для решения которых могут применяться дискретные БСС, определим следующим образом: выполнение измерений с заданной периодичностью в системах, исключающих частое обслуживание узлов с целью замены ИП.

3 Под располагаемым запасом энергии ИП будем понимать ту часть запаса энергии ИП, которая может быть использована для обеспечения функционирования узла.

Характеристики потребления энергии компонентами узлов БСС

Компонент	Ток, потребляемый на активной фазе	Ток, потребляемый на фазе сна
Микропроцессор ATmega128L [54]	8,5 мА (8 МГц)	8,2 мкА
Микропроцессор MSP430F5438A [55]	8,9 мА (25 МГц)	1,2 мкА
Трансивер CC2420 [32]	19,7 мА (RX)	1 мкА
	17,4 мА (TX, 1 мВт)	
Трансивер CC2520 [33]	22,3 мА (RX)	< 1 мкА
	25,8 мА (TX, 1 мВт)	
Датчик температуры SHT10 [56]	550 мкА	0,3 мкА
Датчик давления и температуры FOSP01A [57]	500 мкА	2 мкА

2.5. Синхронизация узлов на основе фактических задержек передачи сообщений

Применение дискретного режима, снижая расход энергии, вместе с тем порождает проблему синхронизации работы узлов сети. Эта проблема заключается в том, что для успешной передачи сообщений между узлами дискретной сети необходимо, чтобы отправитель и получатель сообщения находились на своих активных фазах. Синхронизированное состояние сети не может быть установлено раз и навсегда. Для определения текущего времени таймер-счётчик микропроцессора ведёт подсчёт тактовых импульсов, источником которых является кварцевый осциллятор. На отклонение частоты следования тактовых импульсов от номинального значения влияют несколько факторов: 1) погрешность изготовления, 2) долговременная нестабильность,

3) кратковременная нестабильность, 4) нестабильность, вызванная изменением нагрузки, 5) нестабильность, вызванная изменением напряжения питания, 6) температурная нестабильность [58]. Наиболее существенный вклад в отклонение частоты осциллятора от номинальной вносят погрешность изготовления и температурная нестабильность [59].

Таким образом, синхронизация работы узлов должна выполняться периодически и заключаться в приведении показания собственных часов узла в соответствие с эталонным значением. В качестве эталонного значения удобно использовать время, отмеренное часами шлюза. Рассматриваемый класс дискретных БСС предусматривает распространение по сети сообщений, содержащих сетевую информацию, см. раздел 2.1. Для обеспечения синхронизации в сетевую информацию включается эталонная отметка времени. В начале каждой активной фазы шлюз обнуляет показание собственных часов и это значение (0) использует в качестве эталонной отметки времени.

Однако сетевая информация распространяется по сети с использованием схемы конкурентного доступа к каналу CSMA/CA [28], которая предусматривает случайную величину задержки перед фактической отправкой сообщения. Величина этой задержки не может быть предсказана заранее, но может быть измерена и учтена. Поясним, как это происходит.

Сетевая информация распространяется шлюзом широковещательными сообщениями по многошаговым маршрутам. Действия узлов по синхронизации сети выполняются как при приёме, так и при отправке сообщений с сетевой информацией (см. рис. 2.4).

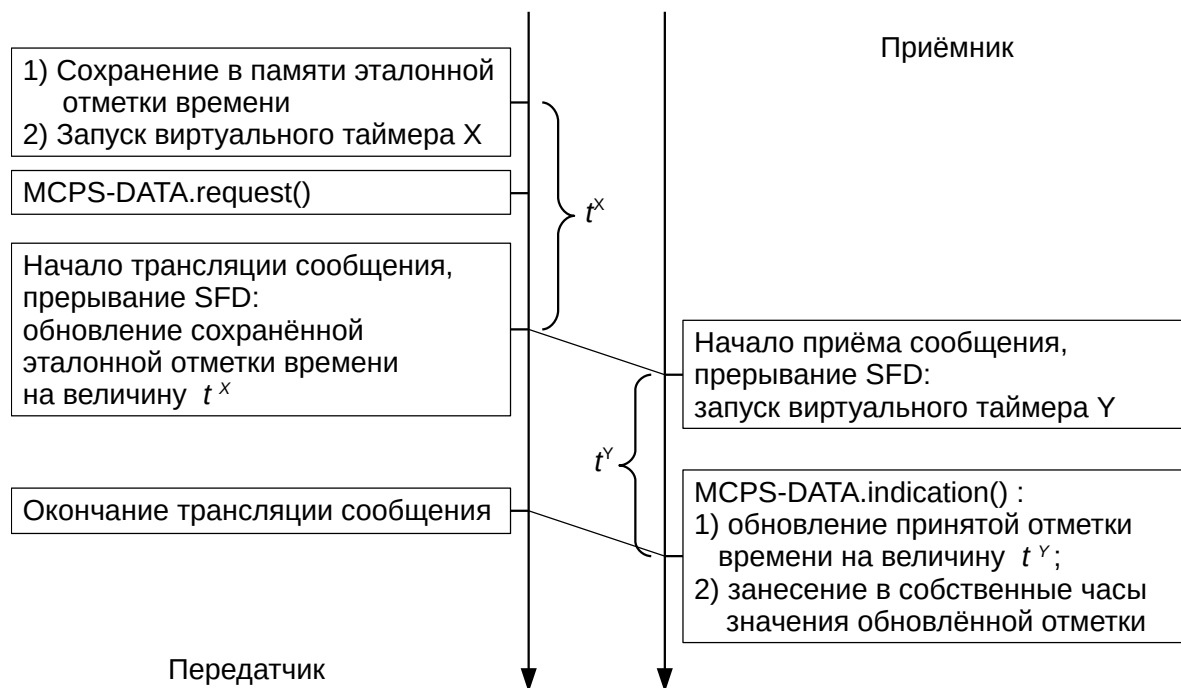


Рис. 2.4. Действия узлов по синхронизации

Отправка сообщения с сетевой информацией. Сформировав сообщение с сетевой информацией, включающей эталонную отметку времени, узел запускает виртуальный таймер X. Затем он передаёт сообщение канальному уровню стека протоколов при помощи запроса MCPS-DATA.request. Исполнение этого запроса включает схему множественного доступа CSMA/CA для получения доступа к каналу в режиме конкуренции. Когда канал освободится, узел переводит трансивер в режим передачи и начинает трансляцию сообщения. В момент начала трансляции на узле происходит прерывание по трансляции символа Start of Frame Delimiter (SFD), обрабатывая которое узел фиксирует значение в таймере X, определяя фактическую величину имевшей место случайной задержки — поправку t^x , и увеличивает на это значение занесённую в буфер трансивера эталонную отметку времени. Такой приём рекомендован производителями трансиверов, например CC2520 [33].

Приём сообщения с сетевой информацией. О начале приёма сообщения узел информируется прерыванием по поступлению символа SFD. Обозначим этот момент времени t^s . Обработка этого прерывания заключается в запуске в общем

случае виртуального таймера Y . По завершении приёма сообщения, о чём сигнализирует оповещение MCPS-DATA.indication [28], узел выполняет его обработку. К величине поступившей эталонной отметки он прибавляет поправку t^Y на длительность приёма и обработки сообщения, накопленную в виртуальном таймере Y , после чего замещает полученным значением показание собственных часов. Теперь его часы синхронизированы с эталоном и могут использоваться для синхронизации других узлов.

Величина, на которую было изменено значение собственных часов узла, используется для определения фактической скорости дрейфа часов этого узла относительно эталона.

Таким образом эталонная отметка времени в составе сообщения с сетевой информацией распространяется по сети, и все узлы сети оказываются синхронизированными со шлюзом. Необходимо заметить, что прерывания по началу передачи и началу приёма сообщения происходят на отправителе и получателе сообщения не одновременно: сообщение должно распространиться от передающей до приёмной антенны. Эту задержку рассмотренным способом устранить нельзя, но её абсолютная величина мала, поэтому этой задержкой можно пренебречь.

2.6. Две активные фазы

Ранее было показано, что приём и передача сообщений неравномерно распределены по активным фазам (см. рис. 1.6): в начале активной фазы узел ретранслирует сообщение с сетевой информацией, остальная часть активной фазы отводится на передачу собственного результата измерения, а также приём и ретрансляцию результатов измерений других узлов, располагающихся на большей глубине в древовидной топологии сети. При этом, чем больше глубина узла, тем позже ему поступает сообщение с сетевой информацией и тем раньше ему поступают результаты измерений для ретрансляции.

На активной фазе работы узла можно перечислить следующие случаи простоя, влекущего за собой бесполезную трату энергии ИП.

1. Между окончанием интервала ожидания альтернативных предложений о подключении к сети и поступлением результатов измерения узлов, находящихся на большей глубине, узел полезной работы не выполняет (свои измерения узел может выполнить во время ожидания, обработки и ретрансляции сообщения с сетевой информацией или в иное удобное время).
2. В конце активной фазы узлы сети, завершившие приём и ретрансляцию результатов измерений, простаивают.

Кроме того, в начале активной фазы также простаивают узлы, расположенные на большой глубине, ожидая, пока до них дойдут сообщения с сетевой информацией. Но величина этого простоя невелика⁴ вследствие однонаправленной передачи сообщений с сетевой информацией, поэтому таким простоем можно пренебречь.

Причиной названных случаев простоев узлов является единое для всех узлов расписание работы. С целью ликвидации указанных случаев простоя узлов, приводящих к дополнительному расходу энергии ИП, класс БСС для космических систем предусматривает работу узлов по индивидуальному расписанию с разделением активных фаз передачи сетевой информации (АФС) и активных фаз сбора результатов (АФР) [60], см. рис. 2.5. Расположение и длительность АФС и АФР выбираются узлами индивидуально по определённым правилам.

АФС используется исключительно для получения и ретрансляции узлами сетевой информации. Результатами распространения сетевой информации являются синхронизация узлов (см. раздел 2.5) и построение древовидной структуры взаимодействия (см. раздел 2.1). АФС заканчивается с окончанием интервала ожидания альтернативных предложений о подключении к сети (см. раздел 2.3).

4 Пример распределения этой величины показан на рис. 5.13.

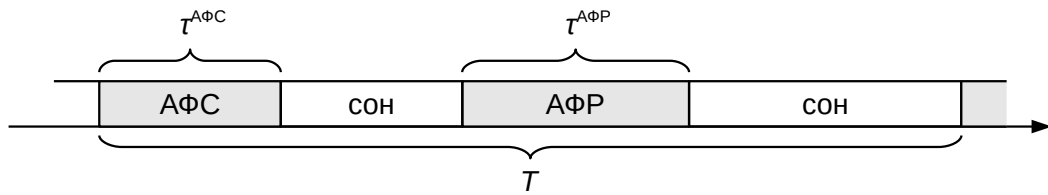


Рис. 2.5. период работы БСС с выделенными АФС и АФР

После АФС наступает краткая фаза сна, продолжительность которой определяется глубиной узла в структуре взаимодействия. Максимальная продолжительность этой фазы сна ограничена подвижностью узлов — чем подвижнее узлы БСС, тем быстрее могут измениться расстояния между ними, сделав невозможной пересылку результатов измерений по зафиксированной при распространении сетевой информации структуре взаимодействия.

По окончании краткого сна начинается АФР, момент наступления которой также определяется глубиной узла. Чем меньше глубина узла, тем позже наступает АФР. Продолжительность АФР определяется на основе интенсивности поступления результатов измерений от потомков в структуре взаимодействия. Взаимное расположение активных фаз узлов различной глубины показано на рис. 2.6.

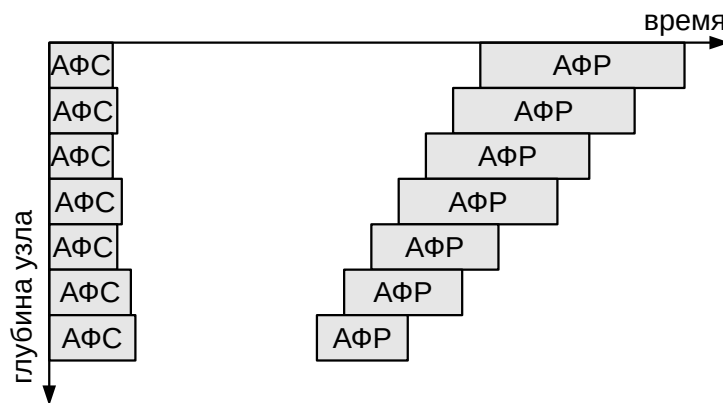


Рис. 2.6. Взаимное расположение активных фаз узлов

Момент начала и длительность АФС в определении не нуждается, т. к. АФС начинается одновременно с началом периода и заканчивается сразу же по окончании интервала приёма альтернативных предложений о подключении к сети. Следовательно, параметрами расписания работы являются параметры АФР — смещение АФР $t^{\text{АФР}}$ относительно начала периода работы и длительность АФР $\tau^{\text{АФР}}$.

Параметры расписания работы показаны на рис. 2.7. Момент синхронизации t^S определяется как момент начала приёма сообщения с сетевой информацией, определяемый прерыванием по получению символа SFD, см. рис. 2.4.

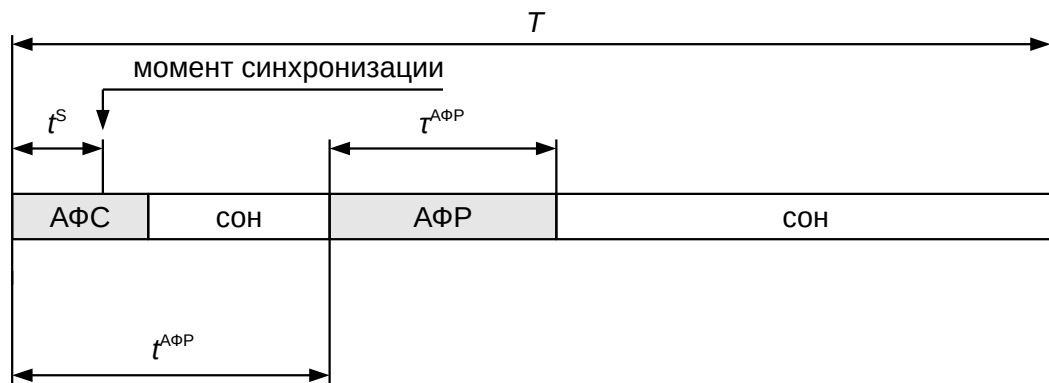


Рис. 2.7. Параметры расписания работы узла

Учитывая то, что АФР узла глубины $k-1$ начинается позже, чем АФР узла глубины k , АФР любого узла должна состоять из двух промежутков, различающихся возможными действиями узла. В начале АФР узел может только принимать результаты потомков, потому что его родитель, которому он должен ретранслировать принятые результаты, ещё находится в состоянии сна, см. рис. 2.8. После начала АФР родителя узел может не только накапливать сообщения с результатами измерений других узлов, но и ретранслировать их своему родителю.

Таким образом, полный период работы каждого из узлов БСС состоит из двух активных фаз (одна — для передачи сетевой информации, вторая — для передачи результатов измерений) и двух фаз сна, длительности и моменты начала которых определяются индивидуально алгоритмом построения расписания. Одна

часть параметров расписания определяется узлами самостоятельно, другая часть определяется шлюзом и передаётся узлам в составе сообщения с сетевой информацией.

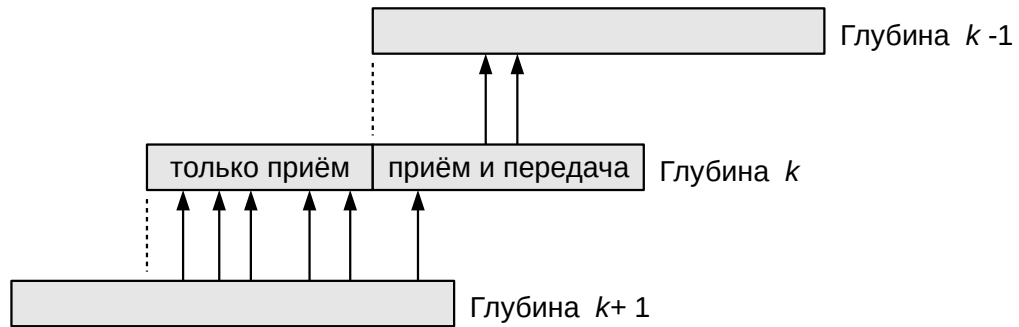


Рис. 2.8. Работа узлов на АФР

2.7. Адаптивное определение параметров АФР

Основными влияющими на надёжность и расход энергии параметрами являются параметры расписания работы узлов — смещение и длительность АФР. Так как КС является объектом изменяемой конфигурации, эти параметры не могут быть определены раз и навсегда для всех узлов. Поэтому предлагается определять их значения с учётом положения узла в сети и фактического потока результатов измерений через него.

Смещение АФР. Предлагается смещение АФР узла определять как смещение АФР его родителя, уменьшенное на фиксированную величину, определяющую смещение АФР потомка относительно родителя. Таким образом, максимальное значение смещения АФР, используемое шлюзом, по мере продвижения сетевой информации вглубь сети уменьшается. Смещение АФР шлюза может быть выбрано достаточно большим, чтобы его хватило для создания сети требуемой глубины. Однако нестационарность КС требует сокращения промежутка времени между формированием структуры взаимодействия (АФС) и её использованием (АФР). Поэтому при определении смещения АФР шлюза

предлагается использовать минимально возможное (с некоторым запасом) значение, определяемое фактической максимальной глубиной узлов сети.

Длительность АФР. Оптимально было бы закончить АФР немедленно после ретрансляции последнего из результатов измерений потомков. Однако из-за отсутствия необходимой информации эта стратегия не реализуема. Поэтому в качестве приближения к оптимальной стратегии предлагается всем узлам БСС самостоятельно определять длительность АФР следующим образом. Устанавливается минимальная продолжительность АФР, в течение которой узел принимает и обрабатывает сообщения. Если за определённый интервал времени перед окончанием АФР сообщений не поступило, узел заканчивает АФР. Если сообщения поступили, АФР продлевается на установленный интервал. Такое продление АФР может быть выполнено многократно.

2.8. Предотвращение передачи дубликатов результатов измерений

При передаче сообщений в БСС вследствие воздействия посторонних помех или передач других узлов сети сообщение может быть повреждено. Для контроля целостности сообщений стандарт IEEE 802.15.4 предусматривает встраивание в их текст контрольной суммы, вычисляемой трансивером передающего узла. Трансивер принимающего узла также вычисляет контрольную сумму принятых байтов и сравнивает своё значение с полученным по радио. При несовпадении значений сообщение считается повреждённым и игнорируется.

Успешная передача сообщений на канальном уровне стека протоколов может подтверждаться кратким сообщением получателя. Такое подтверждение (acknowledgement, АСК) отправляется получателем в том случае, если он успешно принял адресованное лично ему сообщение, в параметрах которого был установлен запрос подтверждения. Непоступление АСК в течение установленного стандартом IEEE 802.15.4 интервала означает, что сообщение могло не дойти до адресата. С целью повышения надёжности БСС в этом случае предусматривается

macMaxFrameRetries дополнительных попыток передачи сообщения (стандартно параметр macMaxFrameRetries имеет значение 3 [28]), рис. 2.9.

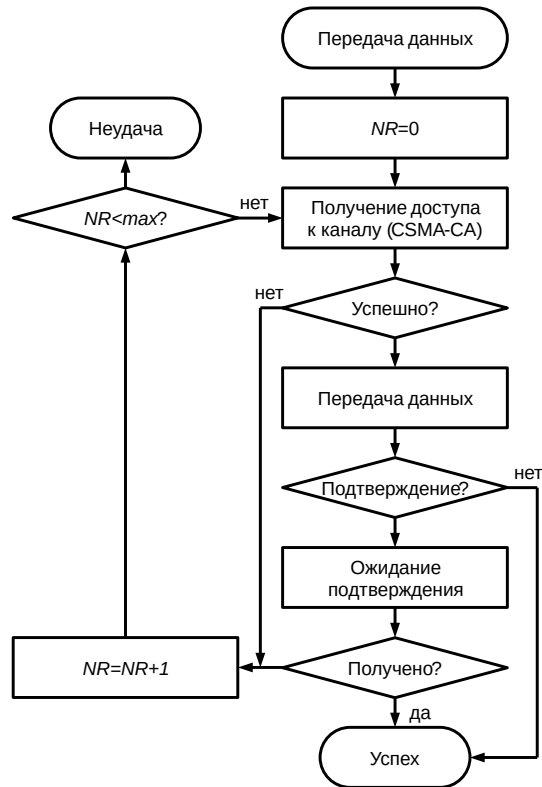


Рис. 2.9. Алгоритм передачи сообщения

Однако может быть повреждено и подтверждение АСК успешно доставленного сообщения. Проявляя настойчивость, отправитель будет повторять передачу уже успешно переданного сообщения, напрасно загружая радиоканал. Для обнаружения таких ситуаций в заголовок сообщения встраивается небольшое целое число — порядковый номер сообщения. Принявший сообщение узел может проанализировать этот номер и, если обнаружит, что уже принимал данное сообщение, проигнорировать его. Этот механизм встроен в канальный уровень стека протоколов, поэтому он не способен определить повтор при проявлении настойчивости сетевым уровнем.

С целью предотвращения передачи дубликатов ранее успешно принятых результатов измерений класс БСС для космических систем предусматривает

сохранение в памяти узла нескольких пар (адрес отправителя, порядковый номер) последних успешно принятых сообщений. При получении очередного сообщения просмотр этого списка пар позволяет выявлять дубликат. Дубликатом считается любое сообщение, пара (адрес отправителя, порядковый номер) которого присутствует в списке успешно принятых. В начале очередной активной фазы список пар очищается. Размер списка пар является параметром класса БСС для космических систем.

2.9. Случайная задержка результата измерения

Несколько узлов сети, одновременно получивших от некоторого узла сообщение с сетевой информацией, становятся потомками этого узла в древовидной структуре взаимодействия. При этом происходит их явная синхронизация с родителем и неявная синхронизация друг с другом. Такая группа потомков одновременно начинает работу схемы CSMA/CA для получения доступа к каналу. Запросы на передачу сообщений концентрируются на небольшом промежутке времени, что повышает уровень мгновенной предложенной нагрузки. В первой главе было продемонстрировано, что высокий уровень конкуренции не только увеличивает задержки доступа к каналу, но и снижает надёжность сети. Это происходит потому, что при получении доступа к каналу в случае его занятости узел может прибегнуть к случайной задержке ограниченное количество раз. Также ограничено и количество попыток отправки сообщения, см. рис. 2.9. Таким образом, если канал продолжительное время занят сообщениями конкурирующих узлов, есть вероятность, что узел откажется от борьбы за канал и результаты измерений не попадут в центр управления. То же самое происходит и в случае, если узлу удаётся отправить сообщение, но оно не доходит до адресата, и тот не отвечает подтверждением АСК. Канальный уровень стека протоколов, обнаружив занятость канала или повторяющуюся неуспешность отправки сообщения некоторому адресату, отказывается от бесконечных и бесполезных

попыток отправки сообщения, предотвращая монополизацию канала в случае выхода адресата из строя, например, вследствие исчерпания запаса ИП.

Традиционным способом реагирования на занятость канала, обнаруженную канальным уровнем стека протоколов, является проявление настойчивости более высоким уровнем стека протоколов, например, сетевым. Вследствие проявления настойчивости узел вновь повторяет попытки отправки сообщения, что ещё больше повышает нагрузку на канал.

Фактически все ожидающие отправки сообщения образуют очередь, распределённую на нескольких узлах. Из теории массового обслуживания известно [61], что для предотвращения образования очередей сообщений сеть передачи данных должна работать с определённой недогрузкой. Таким образом, для предотвращения негативных последствий должна быть снижена предложенная нагрузка на сеть.

Для снижения уровня мгновенной предложенной нагрузки в класс БСС для космических систем введено положение о том, что передача первого сообщения с результатами измерения должна предваряться случайной задержкой.

Использование случайной задержки результатов (СЗР) позволяет распределить сообщения с результатами во времени. Согласовать порядок передачи результатов измерений несколькими узлами не представляется возможным, так как не известен ни состав группы конкурирующих за канал узлов, ни их количество, а само согласование может быть выполнено только посредством обмена сообщениями по радиоканалу. Поэтому для определения порядка предлагается использовать один из механизмов самоорганизации — случайный фактор [34].

Отметим, что случайная задержка используется и при организации множественного доступа к каналу как часть схемы CSMA/CA. Однако эта задержка невелика (при невысоких нагрузках не превышает 2-3 мс), т. к. её введение преследует другую цель — выявить победителя среди нескольких конкурирующих за доступ к каналу узлов. Целью введения СЗР является такое

снижение значения нагрузки, которое позволит сообщениям с результатами, отправленным первыми, успеть покинуть область БСС с высокой конкуренцией за канал и тем самым снизить мгновенное значение предложенной нагрузки. Поэтому величину СЗР предлагается сделать значительно больше величины задержки CSMA/CA — порядка 10-100 мс. Величину СЗР будем определять с использованием равномерного закона распределения случайных величин.

Случайная величина задержки не может гарантировать полное отсутствие очередей. Это объясняется тем, что несколько независимых случайных величин могут принять близкие значения. Следовательно, разумные значения СЗР не могут гарантировать отсутствия потерь сообщений. Поэтому для обеспечения высоких значений надёжности сети используется комбинация СЗР и настойчивости на сетевом уровне стека протоколов.

Позитивным следствием введения СЗР является повышение надёжности БСС. Негативным следствием введения СЗР является увеличение времени сбора результатов измерений от узлов, что приводит к необходимости повышения длительности активных фаз. Величина эффекта обоих названных следствий зависит от закона распределения СЗР. Таким образом, при проектировании БСС должно быть определено некоторое компромиссное значение верхней границы распределения СЗР в сложившихся условиях работы БСС.

2.10. Буферизация сообщений, управляемая качеством связи с родителем

Передаваемые в БСС сообщения состоят из заголовка и содержательной части. Заголовок сообщения включает служебную информацию различных уровней стека протоколов, необходимую для обеспечения передачи сообщения по сети. Содержательная часть сообщения состоит из передаваемых результатов измерений и идентифицирующего источник измерения физического (см. раздел 2.2) адреса узла. Суммарный размер сообщения зачастую намного меньше максимальной длины сообщения, установленной стандартом IEEE 802.15.4. Этот

факт с учётом того, что все результаты измерений направляются в БСС одному адресату — шлюзу, позволяет передавать в одном сообщении не один, а несколько результатов измерений.

Предложен следующий порядок действий. Принятый результат измерения не ретранслируется далее немедленно, а помещается в буфер в оперативной памяти узла. Максимальный размер буфера результатов таков, что он может быть передан одним сообщением. Одновременно с занесением результата измерения в буфер запускается интервальный таймер, ограничивающий время накопления результатов. Если до окончания отмеряемого таймером интервала узлу поступают дополнительные результаты измерений, они также заносятся в буфер. Отсчёт интервала при этом может быть возобновлён с начала. По окончании интервала или по достижении предельного заполнения буфера накопленные результаты измерения передаются далее по маршруту. Такой процесс будем далее называть *буферизацией результатов измерений* [62]. Управляющим параметром буферизации является величина интервала накопления результатов.

Положительным следствием буферизации результатов является снижение трафика в сети: во-первых, сокращается количество передаваемых по сети сообщений; во-вторых, сокращается объём подлежащих передаче данных за счёт того, что передача всего буфера сопровождается только одним заголовком. Таким образом, буферизация результатов позволяет снизить нагрузку на канал. Возможным отрицательным следствием буферизации является увеличение продолжительности активной фазы в случае, если полученный и сохранённый в буфере результат был последним, и ожидание следующих результатов бесполезно. Длительность такого ожидания определяется величиной интервала накопления результатов.

Однако передача буфера, состоящего из нескольких результатов измерений, в случае неидеального качества связи, обусловленного воздействием помех, менее надёжна, чем передача нескольких результатов измерений по отдельности. Поясним сказанное.

В сетях цифровой связи вероятность битовой ошибки тем или иным образом, зависящим от используемого стандарта связи, определяется отношением мощности сигнала к суммарной мощности шумов канала связи и помех (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) [63]. Для успешного приёма сообщения в целом необходимо, чтобы все его биты были приняты успешно. Поэтому при равных значениях SINR вероятность успешного приёма более короткого сообщения выше вероятности успешного приёма более длинного сообщения. Чем хуже SINR, тем разница в вероятности больше, рис. 2.10 (вероятность успешного приёма рассчитана по методике [64] для стандарта IEEE 802.15.4).

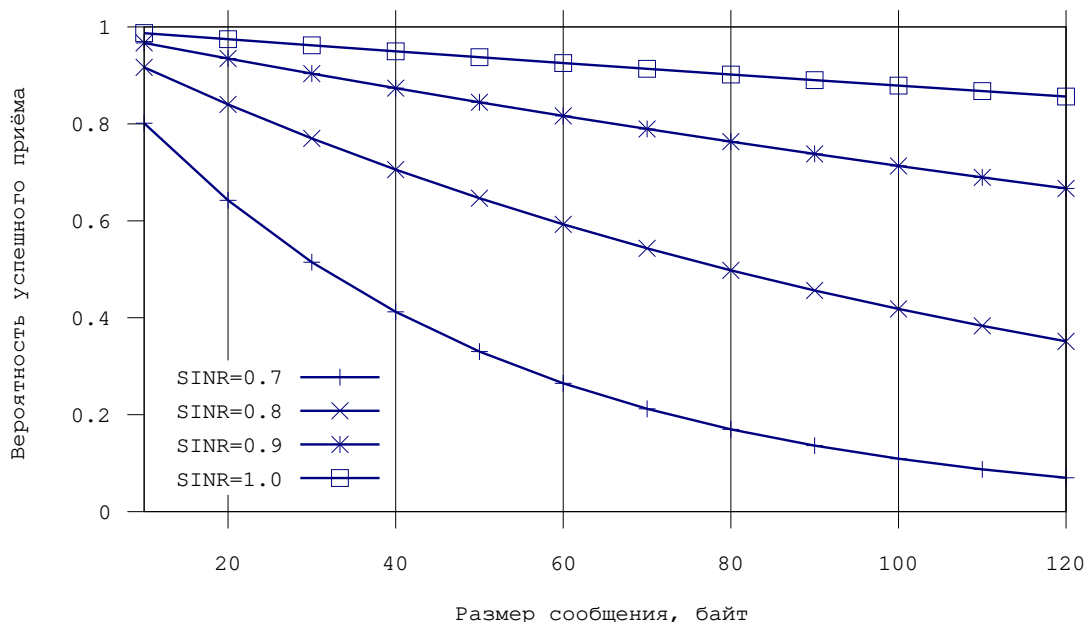


Рис. 2.10. Зависимость вероятности успешного приёма сообщения от длины сообщения для различных значений SINR

Поэтому для обеспечения максимальной надёжности в условиях наличия помех класс БСС для космических систем предусматривает *буферизацию*, управляемую качеством связи с родителем: чем выше качество связи, тем большего размера буфер может быть накоплен. Это положение позволяет сократить потери на шагах маршрута с низким качеством связи и сократить трафик на шагах с высоким качеством связи. Такой подход реализует

теоретическое положение теоремы Шеннона-Хартли о том, что для безошибочной передачи данных при увеличении шумов необходимо использовать код, снижающий скорость передачи данных [65].

Оценить качество связи с родителем узел может при помощи предоставляемого трансивером значения LQI (Link Quality Indicator) [33]. Следует заметить, что качество связи между двумя узлами определяется не только затуханием сигнала, обусловленным расстоянием между узлами и наличием препятствий, но и влиянием помех. Помехи могут быть расположены относительно узлов не симметрично: к одному ближе, от другого дальше. В этом случае помеха будет сильнее воздействовать на тот узел, к которому она расположена ближе. Трансивер измеряет LQI при приёме сетевой информации, т. е. при передаче в направлении от родителя к потомку, а используется измеренное значение LQI при передаче в обратном направлении. В силу несимметричности радиоканала при наличии помех оценка качества связи на основе LQI может учесть лишь влияние затухания радиосигнала вследствие расстояния между узлами и препятствий.

Управляющим параметром класса БСС для космических систем, добавляемым рассмотренным положением, является величина интервала буферизации. Также должен быть определён профиль зависимости между качеством связи с родителем и предельным размером буфера.

Во второй главе работы сформулированы основные положения, определяющие разработанный класс БСС для космических систем. Эти положения включают в себя

- древовидную структуру взаимодействия узлов,
- использование физических адресов,
- обновление адреса родителя,
- дискретный режим работы,

- синхронизацию узлов на основе фактических задержек,
- две активные фазы,
- адаптивное определение параметров АФР,
- предотвращение передачи дубликатов сообщений,
- случайную задержку передачи результатов,
- буферизацию сообщений, управляемую качеством связи.

Глава 3. Алгоритмы и модели БСС для космических систем

В настоящей главе представлена модель класса БСС для космических систем, основные положения которого представлены в предыдущей главе. Эта модель связывает определённые в первой главе показатели работы с алгоритмами, управляющими и топологическими параметрами БСС.

3.1. Постановка задачи моделирования

В соответствии с представленными во второй главе основными положениями класса БСС для космических систем работа таких БСС определяется

- объектом обслуживания Ω ,
- множеством узлов Λ ,
- управляющими параметрами Φ .

Определим названные компоненты модели.

Объект обслуживания Ω определяется множеством его составных частей G , множеством помех Z и моделью потерь при распространении радиоволн M :

$$\Omega = (\{G_i | i = \overline{1, N^{\text{part}}}\}, \{Z_i | i = \overline{1, N^{\text{int}}}\}, M), \quad (3.1)$$

где N^{part} — количество составных частей, N^{int} — количество помех. С объектом обслуживания связана декартова система координат (СК). Модель потерь при распространении радиоволн определяется характеристиками объекта обслуживания. Некоторые часто используемые модели потерь рассмотрены в разделе 3.3. Составная часть представляет собой пару из модели составной части J и закона её перемещения $X^G(t)$. Опустив индексы i , можно записать

$$G = (J, X^G(t)). \quad (3.2)$$

Каждая часть имеет связанную с ней декартову СК. Модель части представляет собой множество пар, состоящих из однородных тел и признака материала тела:

$$J = \{(B_i, \mu_i) | i = \overline{1, N^{\text{bodies}}}\}, \quad (3.3)$$

где B_i — геометрическая модель тела с номером i , μ_i — признак материала тела с номером i , N^{bodies} — общее количество тел, составляющих часть. Геометрические модели тел B_i построены с использованием СК части.

Закон перемещения составной части определяет координаты и углы между осями СК части и СК объекта:

$$X^G(t) = (x_1^G(t), x_2^G(t), x_3^G(t), \alpha_1^G(t), \alpha_2^G(t), \alpha_3^G(t)), \quad (3.4)$$

где $x_1^G(t), x_2^G(t), x_3^G(t)$ — координаты начала СК части в СК объекта обслуживания, $\alpha_1^G(t), \alpha_2^G(t), \alpha_3^G(t)$ — углы между осями СК части и одноимёнными осями СК объекта обслуживания.

Помеха определяется законом изменения спектральной плотности мощности её излучения и законом изменения её положения. Опуская индексы, можно записать

$$Z = (S(f, t), X^Z(t)), \quad (3.5)$$

где f — частота, $S(f, t)$ — закон изменения спектральной плотности мощности $S(f)$ излучения помехи, $X^Z(t)$ — закон изменения положения помехи.

Помеха считается изотропной, поэтому

$$X^Z(t) = (x_1^Z(t), x_2^Z(t), x_3^Z(t)), \quad (3.6)$$

где $x_1^Z(t), x_2^Z(t), x_3^Z(t)$ — координаты помехи в СК объекта обслуживания.

Множество узлов БСС:

$$\Lambda = \{\Theta_i | i = \overline{1, N}\}, \quad (3.7)$$

где Θ_i — узел БСС, N — общее количество узлов сети. Каждый узел (опуская индекс i) определяется следующим образом:

$$\Theta = (A, F, X^\Theta(t), E, V, H, \text{clock}(t)). \quad (3.8)$$

Входящие в (3.8) параметры имеют следующий смысл.

A — уникальный физический адрес узла, 64-разрядное целое число.

F — роль узла в сети:

$$F = \left. \begin{array}{ll} F^{\text{выключен}}, & \text{если узел выключен} \\ F^{\text{шлюз}}, & \text{если узел является шлюзом} \\ F^{\text{маршрутизатор}}, & \text{если узел является маршрутизатором} \\ F^{\text{измеритель}}, & \text{если узел является измерителем} \end{array} \right\}. \quad (3.9)$$

$X^\ominus(t)$ — закон изменения положения узла. Антенна узла считается изотропной, поэтому ориентация узла в пространстве не важна:

$$X^\ominus(t) = (x_1^\ominus(t), x_2^\ominus(t), x_3^\ominus(t)). \quad (3.10)$$

Если некоторый узел k связан с частью l объекта обслуживания, то закон изменения $X_k^\ominus(t)$ его положения связан с законом изменения $X_l^G(t)$ положения и ориентации этой части:

$$X_k^\ominus(t) = f_{kl}(X_l^G(t)), \quad (3.11)$$

где f_{kl} — связь между положением части l и узла k .

E — остаток располагаемого запаса энергии ИП узла. Компоненты узла потребляют энергию ИП в соответствии со своими характеристиками и режимом работы, сокращая остаток запаса энергии. При достижении нулевого значения запаса энергии узел прекращает функционировать.

V — текущий режим работы компонентов узла:

$$V = \left. \begin{array}{ll} V^{\text{sleep}}, & \text{все компоненты спят} \\ V^{\text{TX}}, & \text{узел передаёт сообщение} \\ V^{\text{RX}}, & \text{узел принимает сообщение} \\ V^{\text{RXsense}}, & \text{узел выполняет измерения} \\ V^{\text{RXsleep}}, & \text{процессор спит, трансивер в режиме приёма} \end{array} \right\}. \quad (3.12)$$

H — параметры аппаратуры узла, включая характеристики потребления энергии ИП основными компонентами, размер измерений, выполняемых узлом, начальный запас энергии ИП, характеристики трансивера. Набор параметров аппаратуры узла и их обозначения приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры аппаратуры узла

Обозначение	Параметр
I_{MCU}^{work}	Ток потребления микропроцессора узла в режиме работы
I_{MCU}^{sleep}	Ток потребления микропроцессора узла в режиме сна
I_{TRX}^{RX}	Ток потребления трансивера узла в режиме приёма
I_{TRX}^{TX}	Ток потребления трансивера узла в режиме передачи
I_{TRX}^{sleep}	Ток потребления трансивера узла в режиме сна
$I_{sensors}^{work}$	Ток потребления датчиков узла в режиме выполнения измерения
$I_{sensors}^{sleep}$	Ток потребления датчиков узла в режиме сна
s	Размер результатов измерений узла
E_0	Начальный располагаемый запас энергии ИП узла
P^{TX}	Мощность сигнала, излучаемого узлом
P^{RXmin}	Чувствительность трансивера в режиме приёма

$clock(t)$ — показание часов узла в момент времени t .

Узел Θ_1 является шлюзом.

Управляющие параметры Φ определяются следующим образом:

$$\Phi = (\phi, \varphi). \quad (3.13)$$

Параметры Φ делятся на две группы. Первая группа (ϕ) состоит из значений, определённых при проектировании БСС для космических систем и в течение её работы не изменяющихся, см. табл. 3.2. Вторая группа (φ) содержит смещение АФР шлюза относительно начала периода. Это значение динамически определяется шлюзом на основании анализа текущей топологии. Через параметр φ шлюз управляет работой сети, адаптируя пространственно-временную структуру взаимодействия к текущей конфигурации объекта обслуживания.

Параметры, значения которых не изменяются при работе БСС

Обозначение	Параметр
ϕ_1	Максимальный интервал ожидания альтернативных предложений
ϕ_2	Показатель степени 2 количества хранимых на узле пар (адрес отправителя, порядковый номер) последних успешно обработанных сообщений
ϕ_3	Верхняя граница интервала СЗР
ϕ_4	Количество повторных попыток передачи сообщений
ϕ_5	Интервал буферизации
ϕ_6	Номер строки в таблице, определяющей предельный размер буфера в зависимости от качества связи с родителем
ϕ_7	Защитный интервал АФС и АФР
ϕ_8	Продолжительность ожидания сообщения синхронизации
ϕ_9	Начальная длительность АФР
ϕ_{10}	Квант продления АФР
ϕ_{11}	Смещение АФР родителя относительно потомка
ϕ_{12}	Запас по глубине узла
ϕ_{13}	Запас на распространение сетевой информации

Таким образом, БСС для космических систем определяется кортежем $(\Omega, \Lambda, \Phi, T)$, состоящим из

- объекта обслуживания, определённого выражениями (3.1)-(3.6),
- множества узлов, определённых выражением (3.8),
- параметров работы, определённых выражением (3.13),
- директивно заданной периодичности измерений T .

Подчеркнём, что вследствие нестационарного характера объекта обслуживания может изменяться во времени расположение частей объекта, см.

(3.4), расположение и режим работы помех, см. (3.5) и (3.6), расположение узлов сети, см. (3.10). Изменения в объекте обслуживания и в расположении узлов не являются контролируемыми и могут быть случайными.

В соответствии с изложенным в первой главе показателями работы БСС для космических систем являются надёжность и расход энергии (при использовании автономного невозобновляемого ИП — долговечность). Запишем их выражения.

Надёжность. Надёжность R была определена как отношение количества фактически доставленных в центр управления результатов измерений к количеству результатов измерений, которые должны быть доставлены:

$$R = \frac{n^S}{n^A}, \quad (3.14)$$

где n^S — количество успешно доставленных в центр управления результатов измерений, n^A — количество результатов измерений, которые должны быть доставлены. Надёжность БСС может изменяться с течением времени, например, вследствие изменения конфигурации объекта обслуживания Ω , изменения режима работы помех или выхода из строя отдельных узлов. Надёжность может быть измерена как за всё время работы БСС, так и на некотором ограниченном интервале. В последнем случае мы будем оперировать мгновенным значением надёжности. В качестве такого интервала выберем период работы БСС. Обозначим значение мгновенной надёжности $R(t)$, где t — момент окончания периода работы БСС (интервала измерения надёжности). Для мгновенной надёжности выражение (3.14) должно быть переписано:

$$R(t) = \frac{n^S(t)}{n^A(t)}, \quad (3.15)$$

где $n^A(t)$ — количество результатов измерений, которые должны быть доставлены в центр управления на периоде работы, $n^S(t)$ — количество результатов измерений, которые были успешно доставлены в центр управления на периоде работы. Положим по определению

$$R(0)=1. \quad (3.16)$$

Расход энергии определяется историей работы узла, длительностью его нахождения в том или ином состоянии. Расход энергии измеряется в единицах энергии, например, в мА·ч.

Долговечность узла определяется запасом энергии автономного невозобновляемого ИП и скоростью её расхода. При исчерпании запаса энергии узел прекращает свою работу, т. е. роль узла в сети изменяется на $F^{\text{выключен}}$. Долговечность узлов измеряется в единицах времени.

Долговечность БСС в целом. Определим долговечность БСС как продолжительность функционирования, в течение которой текущий состав узлов обеспечивает надёжность не хуже требуемой или, что то же самое, как продолжительность функционирования до достижения момента времени, когда надёжность снизится до минимально допустимого уровня:

$$D = \arg(R(t) | R(t) = R^{\min}), \quad (3.17)$$

где D — долговечность БСС в целом, R^{\min} — минимально допустимая надёжность.

Первую задачу, которую должна решить модель класса БСС для космических систем, сформулируем следующим образом. Требуется:

- определить значение надёжности БСС $R(t)$ при заданных объекте обслуживания Ω , множестве узлов БСС Λ , управляющих параметрах Φ и требуемой периодичности выполнения измерений T ,
- в случае $R(t) < 1$ сформировать исчерпывающую диагностическую информацию для определения причин, которые привели к снижению надёжности.

Таким образом, первая задача, которую должна решить модель БСС, может быть записана так:

$$(\Omega, \Lambda, \Phi, T) \rightarrow (R(t), W), \quad (3.18)$$

где W — диагностические данные, уточняющие причины неполучения шлюзом результатов измерений тех или иных узлов. Существует три причины, по которым результаты измерений не были доставлены шлюзу:

- узел, который должен был выполнить измерения, выключен вследствие исчерпания им запаса энергии своего ИП;
- узел не получил сообщения с сетевой информацией, например, вследствие перемещения, и потому не передал свои результаты измерений;
- результаты выполненных измерений не дошли до шлюза, оставшись на одном из промежуточных узлов маршрута, например, из-за того, что вследствие высокой конкуренции за канал узел не успел передать сообщение до окончания АФР.

Поэтому диагностические данные состоят из трёх групп:

$$W = (W^{\text{off}}, W^{\text{out}}, \{W^i\}), \quad (3.19)$$

где W^{off} — множество выключенных узлов, W^{out} — множество узлов, не получивших сообщения с сетевой информацией, W^i — множество узлов, чьи результаты измерений к моменту окончания периода работы остались на узле i . Если узел i успешно ретранслировал все результаты измерений, то $W^i = \emptyset$.

Вторая задача, которую должна решить модель БСС для космических систем, — определение долговечности БСС исходя из функции надёжности, полученной в ходе решения первой задачи, и заданного минимально допустимого значения надёжности:

$$(R(t), R^{\text{min}}) \rightarrow D. \quad (3.20)$$

Проектирование БСС для космических систем заключается в выборе количества N узлов БСС, мест их расположения X^\ominus и управляющих параметров Φ функционирования БСС. Решение сформулированных выше задач должно обеспечить возможность оценки решений, принятых при проектировании БСС, за счёт:

- анализа последствий выбора расположения узлов и связанной с расположением узлов топологии сети,

- анализа влияния управляющих параметров на работу БСС.

3.2. Структура и задачи модели

Модель класса БСС для космических систем состоит из следующих структурных компонентов:

- модель радиоканала,
- модель автономной работы узла БСС,
- модели определения долговечности БСС в целом.

В свою очередь модель радиоканала включает в себя

- модель состояния канала,
- модель потерь при распространении,
- модель оповещения узлов о приёме сообщений.

Модель автономной работы узла БСС включает в себя

- модель планирования работы узла,
- модель диспетчера узла,
- модель участия узла в построении структуры взаимодействия,
- модель участия узла в передаче шлюзу результатов измерений,
- модель расхода энергии ИП,
- модель доступа к каналу в режиме конкуренции,
- модель приёма сообщений в условиях помех.

БСС является распределённой системой, процессы одновременно развиваются на нескольких узлах и в радиоканале, между процессами системы существуют причинно-следственные связи, некоторые процессы и величины имеют недетерминированную природу. По этим причинам для исследования работы БСС применяется имитационное моделирование. В соответствии с (3.18) результатом имитационного моделирования работы БСС на протяжении n периодов является конечная последовательность

$$\Xi = \{ \xi_{i|_{i=1}}^n \}, \quad (3.21)$$

$$\xi_i = (t_i, R(t_i), W(t_i)), \quad (3.22)$$

где ξ_i — результат работы БСС на i -ом периоде.

Схема моделирования БСС представлена на рис. 3.1.

Поясним основные компоненты модели БСС и поставленные перед ними задачи.

3.2.1. Радиоканал

Модель радиоканала отвечает за организацию взаимодействия между узлами беспроводной сети. Перед моделью радиоканала ставятся задачи определения потерь при распространении сигнала, учёта состояния канала, оповещения узлов о начале приёма сообщений. Рассмотрим постановку этих задач.

Определение потерь при распространении L сигнала на пути от передающей антенны к приёмной происходит с использованием выбранной модели потерь M и, в зависимости от неё, может учитывать препятствия, образуемые геометрическими телами объекта обслуживания. Положение приёмной антенны обозначим X^{RX} , положение передающей антенны — X^{TX} . Данная задача формулируется следующим образом:

$$L = M(G, X^{TX}, X^{RX}). \quad (3.23)$$

Состояние канала. Состояние канала K в некоторый момент времени t определяется множеством пар, определяющих работающие передатчики. Каждая пара состоит из координат работающего передатчика и его мощности излучения. В качестве передатчиков рассматриваются как узлы БСС, так и помехи:

$$K(t) = \{(X_i^{TX}, P_i^{TX}) | i = 1, \overline{N^{TX}}\}, \quad (3.24)$$

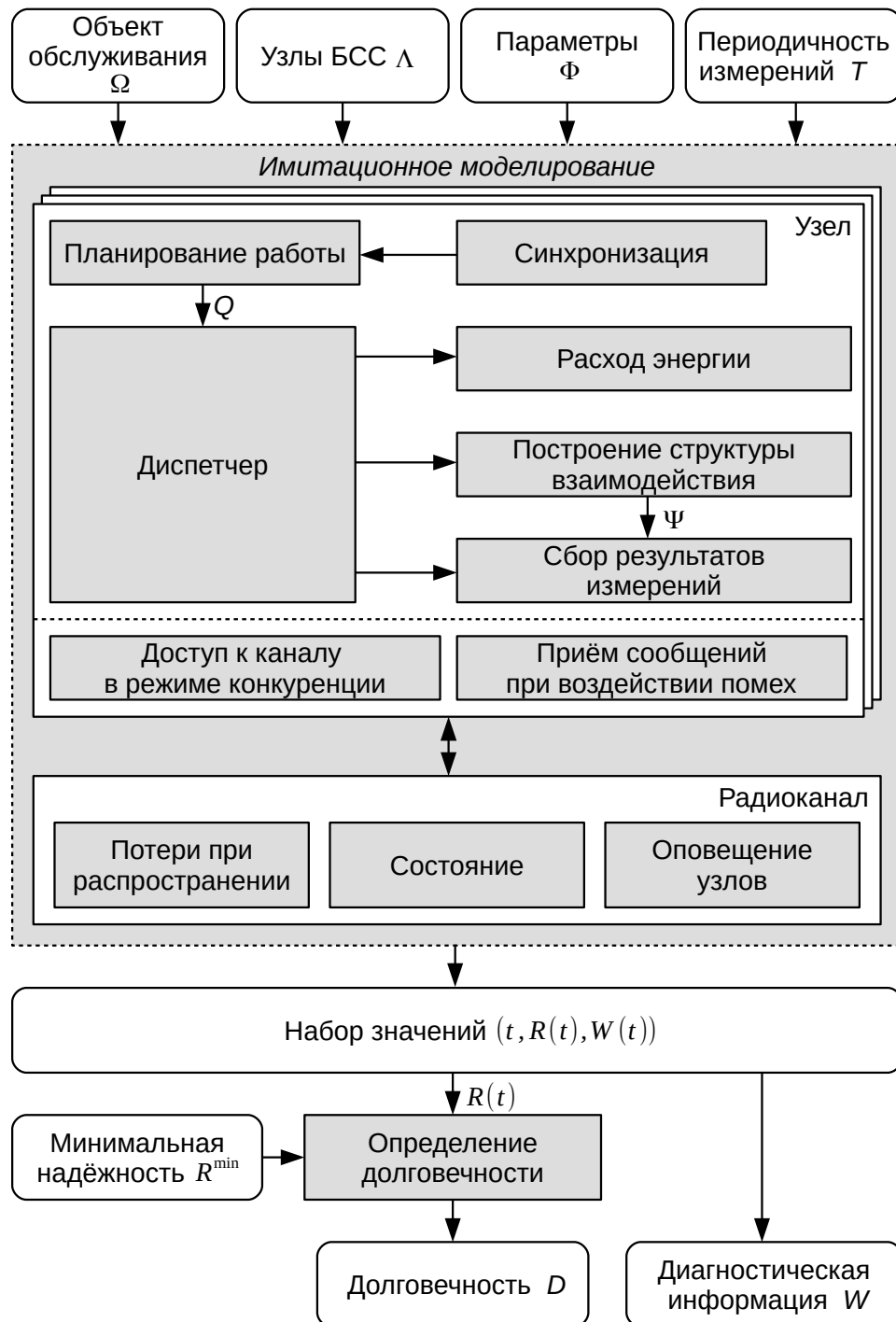


Рис. 3.1. Схема моделирования

где X^{TX} — координаты работающего передатчика, P^{TX} — мощность работающего передатчика, N^{TX} — количество работающих в данный момент времени передатчиков узлов и помех. Начало и окончание передач узлов беспроводной сети, смена режима работы или перемещение помехи изменяет

состояние канала K . Задача учёта состояния канала формулируется следующим образом:

$$K(t+\Delta t)=\text{start_tx}(K(t),X^{\text{TX}},P^{\text{TX}}), \quad (3.25a)$$

$$K(t+\Delta t)=\text{end_tx}(K(t),X^{\text{TX}},P^{\text{TX}}), \quad (3.25b)$$

где $K(t)$ — состояние канала в момент времени t , $K(t+\Delta t)$ — состояние канала в момент времени $t+\Delta t$, $\Delta t>0$, start_tx — событие начала передачи сообщения, end_tx — событие окончания передачи сообщения. Событие, заключающееся в перемещении узла или помехи, изменении мощности помехи моделируется при помощи прекращения предыдущей передачи и начала следующей с новыми характеристиками положения и/или мощности.

Для организации доступа к каналу в режиме конкуренции узлы БСС должны иметь возможность получения информации о текущем состоянии канала в месте своего расположения. Эта процедура называется оценкой состояния канала (Clear Channel Assessment, CCA). Задача CCA формулируется следующим образом:

$$\delta=\text{CCA}(K(t),X^{\text{RX}}), \quad (3.26)$$

где δ — признак, принимающий значение 1 в случае, если радиоканал свободен, и 0 в противном случае.

Оповещение узлов о начале приёма сообщений позволяет узлам выполнить приём сообщений. При этом узлу сообщается, насколько приёму сообщения мешают помехи и другие передаваемые в канале сообщения. Оповещения узла не происходит, если трансивер находится в состоянии сна. Данная задача обозначается interrupt_rx и формулируется следующим образом:

$$(\rho, \kappa)=\text{interrupt_rx}(K(t),\Omega, X^{\text{RX}}, P^{\text{RXmin}}, V), \quad (3.27)$$

где ρ — признак необходимости оповещения узла (1 — оповещение необходимо, 0 — оповещение не нужно), κ — соотношение мощностей полезного сигнала и всех прочих сигналов, включая помехи и шумы канала (SINR), если $\rho=1$.

3.2.2. Узел БСС

Основными задачами, стоящими перед моделью узла БСС, являются моделирование синхронизации, планирования, диспетчеризации, расхода энергии ИП, участия в построении структуры взаимодействия, участия в сборе результатов измерений. Вспомогательными задачами являются моделирование получения доступа к каналу в условиях конкуренции и приёма сообщения в условиях воздействия помех.

Участие узла в формировании пространственной структуры взаимодействия. Как было сказано ранее (см раздел 2.1), пространственная структура взаимодействия узлов является древовидной. Она строится заново на каждом периоде работы узла на АФС. На её вид влияют препятствия и помехи объекта обслуживания, расположение узлов, параметры расписания работы узлов. Сформированная структура взаимодействия Ψ представляет собой множество пар, устанавливающих соответствие между адресом текущего узла A_i и адресом его родителя A_i^p :

$$\Psi = \{(A_i, A_i^p) | i = \overline{1, N}\}. \quad (3.28)$$

Участие узла в построении распределённой структуры взаимодействия заключается в получении, обработке и ретрансляции сообщения с сетевой информацией, используемых для построения пространственно-временной структуры взаимодействия, синхронизации часов узлов, доведения до узлов параметров работы. Эти сообщения передаются в широкополосном режиме с использованием схемы конкурентного доступа к каналу CSMA/CA. В начале АФС шлюз первым передаёт своё сообщение с сетевой информацией. Получившие это сообщение узлы ретранслируют сетевую информацию, внося в неё необходимые изменения.

Принятое узлом сообщение с сетевой информацией Γ содержит следующие данные:

$$\Gamma = (\hat{A}, T, \hat{t}^S, \hat{t}^{АФР}, \hat{k}, \hat{q}), \quad (3.29)$$

где \hat{A} — адрес узла, отправившего сетевую информацию, T — продолжительность периода работы БСС, \hat{t}^S — смещение момента отправки данного сообщения относительно начала текущего периода работы, определённое согласно изложенному в разделе 2.5, $\hat{t}^{АФР}$ — смещение АФР отправителя, \hat{k} — глубина отправителя, \hat{q} — качество связи отправителя со шлюзом. Перед ретрансляцией узел обновляет \hat{A} , \hat{t}^S , $\hat{t}^{АФР}$, \hat{k} и \hat{q} .

Совокупность действий на всех узлах БСС приводит к построению структуры взаимодействия Ψ и выявлению узлов, не получивших сообщения с сетевой информацией, и потому не включённых в Ψ . Данная задача обозначается tree и формулируется следующим образом:

$$(\Psi, W^{out}) = \text{tree}(\Omega, \Lambda, \Phi, Q). \quad (3.30)$$

При решении этой задачи используются решения всех поставленных перед радиоканалом задач.

Синхронизация обеспечивает возможность согласования расписаний работы узлов и заключается в загрузке в часы узла эталонного значения времени \hat{t}^S . Задача синхронизации формулируется следующим образом:

$$\text{clock} = \hat{t}^S. \quad (3.31)$$

Планирование работы узла отвечает за определение параметров расписания узла на ближайший период работы — момента начала АФР $t^{АФР}$ и её длительности $\tau^{АФР}$, а также момента начала АФС $t^{АФС}$ следующего периода. Исходными данными для определения параметров расписания являются управляющие параметры, содержащиеся в сетевой информации, и характеристики предыдущей работы узла. Задача планирования обозначается schedule и формулируется следующим образом:

$$Q = \text{schedule}(k, \hat{t}^{АФР}, \Phi, V), \quad (3.32)$$

где Q — расписание работы узла, V — характеристики предыдущей работы узла. Расписание Q содержит параметры активных фаз:

$$Q = (t^{АФР}, \tau^{АФР}, t^{АФС}). \quad (3.33)$$

Диспетчер узла отвечает за смену режимов работы в соответствии с расписанием и инициирование соответствующих режиму действий. Эта задача обозначается *dispatch* и формулируется следующим образом:

$$V = \text{dispatch}(t, Q). \quad (3.34)$$

Моделирование расхода энергии обновляет запас энергии ИП узла с учётом времени τ , проведённом узлом в том или ином режиме работы. При исчерпании запаса энергии ИП роль узла в сети изменяется на $F^{\text{выключен}}$, и этот узел включается в множество выключенных узлов W^{off} диагностических данных. Данная задача обозначается *discharge* и формулируется следующим образом:

$$(E(t + \tau), F, W^{\text{off}}) = \text{discharge}(\tau, E(t), H, V). \quad (3.35)$$

Участие узла в сборе результатов измерений. Узел переходит в АФР в соответствии с параметрами своего расписания, после чего передаёт собственные и ретранслирует результаты измерения других узлов. Обозначим множество принятых i -ым узлом результатов измерений I_i , отправленных — O_i . Собственный результат измерений обозначим U_i . Задачу отправки результатов обозначим *collect* и сформулируем так:

$$O_i = \text{collect}(I_i \cup U_i). \quad (3.36)$$

При решении этой задачи используются решения всех поставленных перед радиоканалом задач. Теперь количество полученных шлюзом Θ_1 уникальных результатов измерения, необходимое для вычисления надёжности (3.15), определяется следующим образом:

$$n^s = |I_1|. \quad (3.37)$$

Для решения основных задач, стоящих перед моделью узла, формулируются две вспомогательные задачи: получение доступа к каналу в условиях конкуренции и приём сообщения при воздействии помех.

Получение доступа к каналу в условиях конкуренции позволяет узлу начать собственную передачу так, чтобы насколько это возможно не помешать идущим передачам других узлов. Если канал занят, то во избежание коллизии узел

должен отложить собственную передачу, ожидая прекращения передач других узлов. Задачу определения величины задержки w обозначим CSMACA и сформулируем её постановку следующим образом:

$$w = \text{CSMACA}(K(t), X^{\text{RX}}). \quad (3.38)$$

Модель приёма сообщения в условиях воздействия помех позволяет определить вероятность успешного приёма сообщения при воздействии помех. Во время приёма сообщения уровень воздействия помех может изменяться, поэтому на каждый сегмент сообщения⁵ помехи могут оказывать различное влияние. Данная задача обозначена RX и сформулирована следующим образом:

$$p = \text{RX}(m, \{(n_i, \kappa_i) | i = \overline{1, m}\}), \quad (3.39)$$

где p — вероятность успешного приёма всего сообщения, m — количество сегментов в сообщении, n_i — длина i -го сегмента сообщения, κ_i — соотношение мощностей полезного сигнала и всех прочих сигналов, включая помехи и шумы канала, для i -го сегмента сообщения.

3.2.3. Выбор смещения АФР шлюза

В соответствии с положением, изложенным в разделе 2.7, управление работой БСС осуществляется шлюзом с учётом текущей конфигурации объекта обслуживания. Управляемым параметром является смещение АФР шлюза. Исходными данными для шлюза являются сведения о максимальной глубине k_{\max} узлов в сети. Используя значение k_{\max} , шлюз определяет параметры построения пространственно-временной структуры взаимодействия узлов. Эта задача обозначена `initial_ARF` и сформулирована так:

$$\varphi = \text{initial_ARF}(k_{\max}). \quad (3.40)$$

5 Сегментом сообщения будем называть последовательность смежных байтов сообщения, на которые помехи воздействуют с одной и той же интенсивностью.

Выражения (3.21)-(3.40) дополняют и детализируют постановку задач (3.18)-(3.20) моделирования БСС для космических систем. Рассмотрим решение поставленных перед компонентами модели задач.

3.3. Радиоканал

Перед моделью радиоканала были поставлены задачи определения потерь при распространении сигнала (3.23), регистрации начала и окончания передачи сообщений узлами сети (3.25), оповещения узлов о начале приёма сообщений (3.27), оценки состояния канала (3.26). Рассмотрим решение этих задач.

3.3.1. Определение потерь при распространении сигнала

Определение величины потерь происходит при помощи модели M (3.23), являющейся одним из параметров объекта обслуживания. Потери мощности сигнала на пути от передающей антенны к приёмной являются наибольшими потерями, вносимыми одной причиной [65]. Величина этих потерь определяется следующим образом [66, 67]:

$$L = \frac{P^{RX}}{P^{TX}}, \quad (3.41)$$

где P^{RX} — мощность принятого сигнала. Если величина потерь выражена в децибелах (для такой величины будем использовать обозначение L^{dB}), то эти величины связаны выражением

$$L^{dB} = 10 \log_{10} L. \quad (3.42)$$

Величина потерь в общем случае зависит от расстояния между передающей и приёмной антеннами и от среды распространения электромагнитного излучения. Разработано и проанализировано много моделей потерь распространения радиоволн [66-105], различающихся характерными условиями их распространения. В зависимости от характеристик объекта обслуживания при

моделировании радиоканала может использоваться та или иная подходящая модель потерь M .

Все модели потерь делятся на три группы: теоретические, статистические и специфические. В теоретических моделях потери вычисляются проще всего, но такие модели имеют ограниченное применение. Статистические модели учитывают больше факторов, они точнее, но их точность высока в идеальных условиях и снижается по мере отклонения условий распространения от идеальных. Специфические модели учитывают конфигурацию реального объекта обслуживания. Такие модели — самые точные, но время выполнения расчётов может быть неприемлемо велико.

Если объект обслуживания не препятствует распространению радиоволн, то может быть использована **модель потерь в свободном пространстве** (Friis) [66, 68]. Эта модель — теоретическая, она получена в предположении равномерного распределения мощности излучённого сигнала по поверхности сферы с центром в точке расположения передающей антенны и радиусом, равным расстоянию d между передающей и приёмной антеннами:

$$L_0 = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (3.43)$$

где L_0 — величина потерь при распространении в свободном пространстве, λ — длина волны. Для небольших расстояний эта модель не применима, например, при $d < \frac{\lambda}{4\pi}$ согласно этой модели сигнал будет усиливаться. Однако для расстояний между узлами, характерных для БСС, данное ограничение модели потерь распространения в свободном пространстве несущественно.

Если явно не указано иное, то в последующих моделях величина L_0 полагается определённой при помощи выражения (3.43). Величина L_0^{dB} определяется согласно (3.42) для L_0 . Модель потерь (3.43) подходит для

орбитального сегмента космических систем, если влиянием геометрии КА можно пренебречь.

При работе наземного сегмента КС в городской среде может быть использована эмпирическая модель потерь **Okumura et al.** [84, 65, 69]. Эта модель выражается следующим образом:

$$L_{50}^{\text{dB}} = L_0^{\text{dB}} + A_{50}(f, d) - G(h^{\text{TX}}) - G(h^{\text{RX}}) - G^{\text{AREA}}, \quad (3.44)$$

где L_{50}^{dB} — медианная величина потерь, $A_{50}(f, d)$ — медианное затухание в среде относительно свободного пространства, f — частота радиоволн, $G(h^{\text{TX}})$, $G(h^{\text{RX}})$ — коэффициенты усиления, зависящие от высоты передающей и приёмной антенн соответственно, G^{AREA} — коэффициент усиления городской среды. Значения $A_{50}(f, d)$ и G^{AREA} могут быть найдены при помощи эмпирических кривых. Модель Okumura является стандартом для планирования систем сотовой связи в Японии [69].

Модель **Hata** [71, 65, 69] является параметрическим вариантом модели Okumura:

$$L_{50}^{\text{dB}} = 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h^{\text{TX}} - a(h^{\text{RX}}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h^{\text{TX}}) \log_{10} d + b, \quad (3.45)$$

где f — частота радиоволн в МГц, h^{TX} — высота передающей антенны в метрах, h^{RX} — высота приёмной антенны в метрах, $a(h^{\text{RX}})$ — поправка, учитывающая эффективную высоту антенны и зависящая от размера области покрытия, b — поправка, учитывающая открытость местности. Для небольших и средних населённых пунктов

$$a(h^{\text{RX}}) = 1.1(\log_{10} f - 0.7)h^{\text{RX}} - 1.56(\log_{10} f - 0.8), \quad (3.46)$$

для крупных населённых пунктов

$$a(h^{\text{RX}}) = \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54 h^{\text{RX}}))^2 - 1.1, & f < 300 \text{ МГц} \\ 3.2(\log_{10}(11.75 h^{\text{RX}}))^2 - 4.97, & f \geq 300 \text{ МГц} \end{cases}. \quad (3.47)$$

Поправка b в зависимости от типа местности определяется так:

$$b = \left. \begin{array}{l} 0, \\ -2(\log_{10}(f/28))^2 - 5.4, \\ -4.78(\log_{10}f)^2 - 18.33 \log_{10}f - 40.98, \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{город} \\ \text{пригород} \\ \text{сельская местность} \end{array} \quad (3.48)$$

Необходимо отметить, что применимость модели Hata ограничена диапазоном частот 150-1500 МГц.

Рекомендация ITU-R P.1411 содержит две модели потерь, предназначенных для планирования локальных беспроводных сетей в диапазоне от 300 МГц до 100 ГГц: при наличии прямой видимости (Line of Sight, LOS) и при отсутствии прямой видимости (NLOS) между передатчиком и приёмником.

Модель **ITU-R P.1411 LOS** [85] используется в случае беспроводной связи при наличии прямой видимости вне помещений на небольших расстояниях. Она подходит для объектов обслуживания на улицах города, ограниченных многоэтажными зданиями. Эта модель определяет нижнюю $L_{\text{low}}^{\text{dB}}$ и верхнюю $L_{\text{upper}}^{\text{dB}}$ границы потерь:

$$L_{\text{low}}^{\text{dB}} = L^{\text{bp}} + \left\{ \begin{array}{l} 20 \log_{10} \frac{d}{R^{\text{bp}}}, \quad d \leq R^{\text{bp}} \\ 40 \log_{10} \frac{d}{R^{\text{bp}}}, \quad d > R^{\text{bp}} \end{array} \right\}, \quad (3.49)$$

$$L_{\text{upper}}^{\text{dB}} = L^{\text{bp}} + 20 + \left\{ \begin{array}{l} 25 \log_{10} \frac{d}{R^{\text{bp}}}, \quad d \leq R^{\text{bp}} \\ 40 \log_{10} \frac{d}{R^{\text{bp}}}, \quad d > R^{\text{bp}} \end{array} \right\}, \quad (3.50)$$

где R^{bp} — расстояние до излома, L^{bp} — величина потерь на расстоянии излома. R^{bp} определяется выражением

$$R^{\text{bp}} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda}, \quad (3.51)$$

где h_1 и h_2 — высота приёмной и передающей антенн соответственно, λ — длина волны. L^{bp} определяется выражением

$$L^{\text{bp}} = \left| 20 \log_{10} \frac{l^2}{8\pi h_1 h_2} \right|. \quad (3.52)$$

Модель **ITU-R P.1411 NLOS** [85] основана на моделях COST⁶-231, Walfisch [86], Ikegami [87], расширяя диапазон частот модели Nata и сокращая возможное расстояние между приёмником и передатчиком до 20 м. Эта модель учитывает потери сигнала при распространении поверх крыш зданий. Она включает три составляющих:

$$L^{\text{dB}} = \begin{cases} L_0^{\text{dB}} + L_1 + L_2, & L_1 + L_2 > 0 \\ L_0^{\text{dB}} & L_1 + L_2 \leq 0 \end{cases}, \quad (3.53)$$

где L_1 — потери вследствие дифракции при распространении сигнала над крышами зданий, L_2 — потери вследствие прохождения сигнала сквозь здания и на переотражения. Величина L_0^{dB} определяется выражением

$$L_0^{\text{dB}} = 32.4 + 20 \log_{10} \frac{d}{1000} + 20 \log_{10} f, \quad (3.54)$$

где частота f выражена в МГц. Величина L_1 определяется так:

$$L_1 = -8.2 - 10 \log_{10} w + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10}(\Delta h) + L_3, \quad (3.55)$$

где w — ширина улиц в метрах, Δh — разность высот между крышами с установленными на них антеннами базовых станций и антеннами мобильных устройств, L_3 — поправка, учитывающая величину угла ϕ (в градусах) между прямой, соединяющей передатчик и приёмник, и направлением улиц:

$$L_3 = \begin{cases} -10 + 0.354 \phi, & 0 \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases}. \quad (3.56)$$

Значение члена L_2 зависит от величины критерия d^s , определяемой следующим образом:

$$d^s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h^2}. \quad (3.57)$$

Если протяжённость l зданий превышает d^s , $l > d^s$, то

6 Аббревиатура COST обозначает рабочий комитет Co-operative for Scientific and Technical research [88], созданный для развития модели Nata.

$$L_2 = L_4 + k^a + k^d \log_{10} \frac{d}{1000} + k^f \log_{10} f - 9 \log_{10} b, \quad (3.58)$$

где L_4 и k^a характеризуют рост потерь при малом возвышении антенны базовой станции над крышей, коэффициенты k^d и k^f управляют величиной потерь вследствие дифракции в зависимости от расстояния и частоты соответственно, b — характерное расстояние между зданиями, измеренное вдоль прямой, соединяющей передатчик и приёмник. Обозначим через Δr величину возвышения антенны базовой станции над крышей. Теперь величина L_4 определяется следующим образом:

$$L_4 = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta r), & \Delta r > 0 \\ 0, & \Delta r \leq 0 \end{cases}, \quad (3.59)$$

а величина k^a определяется так:

$$k^a = \begin{cases} 71.4, & \Delta r > 0, f > 2000 \text{ МГц} \\ 54, & \Delta r > 0, f \leq 2000 \text{ МГц} \\ 54 - 0.8 \Delta r, & \Delta r \leq 0 \text{ и } d \geq 500 \text{ м} \\ 54 - 1.6 \Delta r, & \Delta r \leq 0 \text{ и } d < 500 \text{ м} \end{cases}. \quad (3.60)$$

Коэффициент k^d определяется следующим образом:

$$k^d = \begin{cases} 18, & \Delta r > 0 \\ 18 - 15 \frac{\Delta r}{h}, & \Delta r \leq 0 \end{cases}, \quad (3.61)$$

где h — высота крыш. Коэффициент k^f зависит от типа населённого пункта:

$$k^f = \begin{cases} -8, & f > 2000 \text{ МГц} \\ -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & f \leq 2000 \text{ МГц, пригород, небольшой город} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), & f \leq 2000 \text{ МГц, мегаполис} \end{cases}. \quad (3.62)$$

При $l \leq d^s$ используется следующее выражение:

$$L_2 = -20 \log_{10} Q_m, \quad (3.63)$$

где

$$Q_m = \begin{cases} 2.35 \left(\frac{\Delta r}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0.9}, & \Delta r > 0 \\ \frac{b}{d}, & \Delta r \approx 0 \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right), & \Delta r < 0 \end{cases}, \quad (3.64)$$

где

$$\theta = \arctan \frac{\Delta h}{b}, \quad (3.65)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h^2 + b^2}. \quad (3.66)$$

Логарифмически-нормальная модель [65, 89, 90] основана на том, что средние потери в зависимости от расстояния между передающей и приёмной антеннами могут быть выражены при помощи степенной функции расстояния:

$$L^{\text{dB}} = L^{\text{dB}}(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (3.67)$$

где d_0 — эталонное расстояние, n — показатель степени. Название модели обусловлено тем, что график $L^{\text{dB}}(d)$ в логарифмическом масштабе представляет собой прямую с наклоном $10n$. Значение n определяется свойствами объекта обслуживания: в свободном пространстве n равно 2 и данная модель фактически сводится к (3.43), в случае наличия эффекта волновода, например, при распространении по улицам города, n может быть меньше 2, при наличии препятствий — больше 2 [65].

Определению показателя степени n для различных условий объектов обслуживания посвящён ряд работ. Например, в работе [91] определены значения n для полевых условий, лесов и заросших лесом холмов для диапазона ISM 915 МГц.

Двухзонная логарифмически-нормальная модель [69, 73] развивает логарифмически-нормальную модель. Она основана на учёте двух лучей — прямого и отражённого от поверхности. Справедливость такого подхода была впервые продемонстрирована в 1922 г. Б.А. Введенским [92]. Данная модель

применима при наличии прямой видимости между узлами, например, когда они находятся на некоторой высоте над поверхностью. Потери на распространение в случае использования этой модели определяются следующим образом:

$$L^{\text{dB}} = \begin{cases} L^{\text{b}} + 10 n_1 \log_{10} d + L^{\text{dB}}(d_0), & d_0 < d < d^* \\ L^{\text{b}} + 10(n_1 - n_2) \log_{10} d^* + 10 n_2 \log_{10} d + L^{\text{dB}}(d_0), & d \geq d^* \end{cases}, \quad (3.68)$$

где d_0 — эталонное расстояние, минимально допустимое для данной модели, $L^{\text{dB}}(d_0)$ — величина потерь на эталонном расстоянии, d^* — расстояние излома, L^{b} — слагаемое потерь, зависящее от частоты и высоты антенн узлов, n_1 и n_2 — коэффициенты наклона участков модели до и после точки излома соответственно. Во многих случаях можно полагать $n_1=2$, для n_2 такой определённости нет — значение этого коэффициента может колебаться от 2 до 7.

Модель Tewari, Swarup, Roy может быть использована при работе в тропических лесах в диапазоне от 50 до 800 МГц [93] на расстояниях от 40 до 4000 м:

$$L^{\text{dB}} = 88 + 20 \log_{10} f + 40 \log_{10} d - 20 \log_{10}(h^{\text{TX}} h^{\text{RX}}) + L^{\text{foliage}}, \quad (3.69)$$

где f — частота в МГц, d — расстояние между передатчиком и приёмником в километрах, h^{TX} и h^{RX} — высота передающей и приёмной антенны в метрах, соответственно, L^{foliage} — потери, вызванные прохождением радиосигнала сквозь листву.

Модель Weissberger применяется в случаях прямолинейного распространения сигнала через сухую листву плотного леса на расстояниях до 400 м, частота от 230 МГц до 95 ГГц [83]:

$$L^{\text{foliage}} = \begin{cases} 0.45 f^{0.284} d, & d \leq 14 \\ 1.33 f^{0.284} d^{0.588}, & 14 < d \leq 400 \end{cases}, \quad (3.70)$$

где f — частота в МГц, d — ширина леса в метрах.

Модель ITU-R P.530 разработана на основе теории дифракции для открытой местности [94]. Она позволяет определить величину дополнительных потерь, вызванных препятствием на линии распространения сигнала:

$$L_A^{\text{dB}} = 10 - 20 \frac{h^L - h^O}{F_1}, \quad (3.71)$$

где L_A^{dB} — величина дополнительных потерь, h^L — высота линии, соединяющей передающую и приёмную антенны, в метрах, h^O — высота препятствия, в метрах, F_1 — радиус первой зоны Френеля, определяемый выражением

$$F_1 = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}}, \quad (3.72)$$

где f — частота в ГГц, d — расстояние между приёмником и передатчиком, в километрах, d_1 и d_2 — расстояние от препятствия до передатчика и приёмника, в километрах.

Модель ITU-R P.1238 применяется для моделирования объектов обслуживания в помещениях при частотах от 900 МГц до 100 ГГц [95]. Выражение для потерь имеет вид:

$$L^{\text{dB}} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L^{\text{floor}}(n) - 28, \quad (3.73)$$

где f — частота в МГц, d — расстояние между передатчиком и приёмником, в метрах, $d \geq 1$, N — коэффициент потерь мощности в зависимости от расстояния, n — количество перекрытий между приёмником и передатчиком, $n \geq 1$, $L^{\text{floor}}(n)$ — коэффициент потерь мощности на преодоление перекрытий. Значения N и $L^{\text{floor}}(n)$ для различных диапазонов и типов помещений табулированы.

Теоретические и статистические модели потерь позволяют быстро вычислить величину потерь, но для обеспечения высокой точности таких вычислений применяемые модели должны соответствовать реальным условиям объекта обслуживания. При использовании статистических моделей должна быть выполнена настройка параметров, в том числе, экспериментально.

Трассировка лучей. Самостоятельным методом моделирования потерь при распространении является трассировка лучей методами геометрической оптики

[96, 69, 97]. В этом случае объект обслуживания представляется набором геометрических тел, ограниченных поверхностями. Предполагается, что источники излучения испускают большое количество лучей в различных направлениях⁷. В случае изотропной антенны мощность излучения равномерно распределяется между всеми испущенными лучами.

При распространении лучей учитываются дифракция, отражение, рассеяние, преломление. Каждый испущенный источником луч обрабатывается в соответствии со следующим алгоритмом [97].

1. Проверяется, пересекает ли луч область приёмной антенны раньше, чем попадает на поверхность какого-либо тела. Если пересекает, то луч учитывается, внося свой вклад в приём сигнала в соответствии со своей остаточной мощностью.
 2. Отыскивается ближайшее место пересечения луча с каким-либо телом объекта обслуживания.
 3. Если такого пересечения не найдено, луч считается покинувшим объект обслуживания и исключается из рассмотрения. Происходит переход к п. 9.
 4. Определяется мощность луча, уменьшившаяся в зависимости от свойств среды распространения.
 5. Если местом пересечения является не угол тела, переход к п. 7.
 6. Моделируется дифракция: исходный луч исключается, вместо него создаются новые лучи, между которыми распределяется мощность исключённого луча. Выполняется переход к п. 8.
 7. Луч исключается из рассмотрения. Вместо него добавляются в рассмотрение два луча — отражённый и проникший в тело, испытав преломление. В зависимости от угла падения и свойств материала тела между вновь созданными лучами распределяется мощность исключённого луча.
- 7 Например, при использовании сферической СК лучи могут испускаться с фиксированным шагом 1° по азимутальному и зенитному углам.

8. Если мощность некоторого луча стала меньше предельно допустимой, такой луч из рассмотрения исключается.
9. Если лучей не осталось, работа завершается, иначе переход к п. 1.

В результате трассировки всех лучей определяется мощность на приёмной антенне. При сложении лучей учитывается, что различные лучи имеют различное запаздывание.

Такой подход позволяет получить результаты высокой точности, но не обладает высоким быстродействием вследствие большого числа трассируемых лучей и необходимости проверять их пересечения с большим количеством поверхностей.

Разработаны коммерческие программы трассировки лучей, например, Wireless InSite [98].

Модель конечных разностей во временной области (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) была предложена К. Уее [99] для численного решения уравнений Максвелла. Для простых объектов обслуживания под открытым небом обычно используется двумерная модификация FDTD [100]. Разработаны методы, комбинирующие трассировку лучей и FDTD [101]. В таких методах подходы геометрической оптики используются для обработки больших открытых пространств, а FDTD — для обработки областей с мелкими деталями, с которыми трассировка лучей справляется не лучшим образом. Существуют как коммерческие программы FDTD, так и бесплатные с открытым кодом, например, Меер [102].

Модели искусственных нейронных сетей (ИНС) [103, 69, 104, 105] демонстрируют более высокую производительность по сравнению с моделями трассировки лучей и моделями FDTD, в то же время выигрывая у статистических моделей в точности. Модели ИНС применяются для определения потерь как в помещениях, так и в открытом пространстве. На плане помещения строится сетка с небольшим шагом (порядка 10 см). Все области плана классифицируются — комната, коридор, стена и т. д., образуя k категорий. ИНС имеет $k+1$ входов. На

один вход ИНС поступает нормированная длина отрезка, соединяющего приёмник с передатчиком. На остальные k входов ИНС поступают нормированные значения, характеризующие этот отрезок по набору категорий. Например, для категории «коридор» подаётся доля пути, приходящаяся на коридор; для категории «стена» подаётся количество стен и т. д. В ходе обучения ИНС учится предсказывать величину потерь по вектору значений признаков. Процесс обучения может занимать продолжительное время, но после обучения модель работает быстро.

Рассмотренные модели потерь при распространении радиоволн представлены в таблице 3.3.

3.3.2. Состояние канала

Перед моделированием состояния канала поставлено две задачи — учёт состояния канала в каждой точке объекта обслуживания (3.25) и выполнение процедуры ССА, т. е. определение возможности начала передачи сообщения конкретным узлом БСС (3.26).

Учёт состояния канала. Регистрация начала передачи сообщения узлом с координатами X^{TX} и мощностью P^{TX} заключается в изменении множества работающих передатчиков, зафиксированных в состоянии канала (3.24):

$$K(t+\Delta t) = K(t) \cup \{(X^{TX}, P^{TX})\}, \quad (3.74)$$

где Δt — любой сколь угодно малый интервал времени, $\Delta t > 0$.

Регистрация окончания передачи сообщения узлом с координатами X^{TX} и мощностью P^{TX} также заключается в изменении множества работающих передатчиков:

$$K(t+\Delta t) = K(t) \setminus \{(X^{TX}, P^{TX})\}. \quad (3.75)$$

По окончании передачи сообщения необходимо определить узлы, которые могут его получить, и оповестить их. Модель этих действий представлена далее, в разделе 3.3.3.

Модели потерь при распространении радиоволн

№	Модель потерь	Область применения	Ссылки
Теоретические модели			
1.	Модель потерь в свободном пространстве	Свободное пространство без препятствий	[66, 68]
2.	Модель ITU-R P.530	Прямая видимость с препятствием	[94]
Статистические модели			
3.	Okumura et al.	Городская среда	[84, 69]
4.	Hata	Городская среда, пригороды, сельская местность; до 1500 МГц	[71, 69]
5.	Модель ITU-R P.1411	Городская среда	[85, 69]
6.	Логарифмически-нормальная модель	Городская среда, помещение	[65, 89, 90]
7.	Двухзонная логарифмически-нормальная модель	Городская среда, прямая видимость	[69, 73]
8.	Модель Tewari, Swarup, Roy	Тропические леса; 40...800 МГц; 40...4000 м	[93]
9.	Модель Weissberger	Прямая видимость, лес; 230 МГц...95 ГГц	[83]
10.	Модель ITU-R P.1238	Помещение	[95]
Специфические модели			
11.	Трассировка лучей	Любая среда	[69, 96, 97]
12.	Модель конечных разностей во временной области	Любая среда	[99-101, 77]
13.	Модель ИНС	Любая среда	[103-105]

Механизмы (3.74) и (3.75) используются и для регистрации работы помех. Предварительно для помехи на основе её спектральной плотности мощности определяется мощность излучения P^Z в моделируемом канале:

$$P^Z(t) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f, t) df, \quad (3.76)$$

где f_{\min} и f_{\max} — соответственно минимальная и максимальная частота моделируемого канала.

Изменение мощности передачи и/или положения узла или помехи моделируется путём окончания передачи с прежними значениями параметров при помощи (3.75) и началом передачи с новыми значениями при помощи (3.74).

Процедура ССА. Канал считается занятым, если суммарная мощность сигналов, обнаруживаемых приёмником, превышает некоторое пороговое значение P^{limit} . Суммарная мощность принимаемых в точке с координатами X^{RX} сигналов в канале K определяется следующим образом:

$$P^{\text{RX}} = \sum_{(X_i^{\text{TX}}, P_i^{\text{TX}}) \in K} P_i^{\text{TX}} M(G, X_i^{\text{TX}}, X^{\text{RX}}). \quad (3.77)$$

Результат процедуры ССА в зависимости от P^{RX} и P^{limit} определяется так:

$$\delta = \begin{cases} 1, & P^{\text{RX}} \leq P^{\text{limit}} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (3.78)$$

Величина P^{limit} может быть задана в широких пределах.

3.3.3. Оповещение узлов о начале приёма сообщений

Для оповещения узлов о начале приёма сообщений модель радиоканала при начале передачи сообщения некоторым узлом (3.74) должна определить множество узлов, которые в состоянии принять. Для каждого из узлов вычисляется признак ρ (3.27).

Приём сообщения возможен при условии, что мощность принятого сообщения не должна быть менее чувствительности трансивера. Т.е. должно выполняться условие

$$P^{\text{RX}} > P_i^{\text{RXmin}}. \quad (3.79)$$

В соответствии с (3.41) P^{RX} определяется следующим образом:

$$P^{\text{RX}} = P^{\text{TX}} M(G, X^{\text{TX}}, X_i^{\text{RX}}). \quad (3.80)$$

Кроме выполнения условия (3.80) узел не должен быть выключен, а его трансивер должен быть включён на приём:

$$F_i \neq F^{\text{выключен}} \wedge (V_i = V^{\text{RX}} \vee V_i = V^{\text{RXsleep}}). \quad (3.81)$$

Одновременное выполнение условий (3.80) и (3.81) позволяет включить данный узел в список кандидатов на получение сообщения. Для принятия решения об оповещении некоторого узла вычисляется соотношение между мощностью сообщения, поступающего этому узлу, и суммарной мощностью всех других излучений (сообщений узлов и помех), также поступающих этому узлу:

$$\kappa = \frac{P^{\text{RX}}}{P^{\text{other}}}, \quad (3.82)$$

где P^{other} — суммарная мощность излучений всех других источников. Эта величина определяется следующим образом:

$$P^{\text{other}} = \sum_{\substack{(X_i^{\text{TX}}, P_i^{\text{TX}}) \in K \\ (X_i^{\text{TX}}, P_i^{\text{TX}}) \neq (X^{\text{TX}}, P^{\text{TX}})}} P_i^{\text{TX}} M(G, X_i^{\text{TX}}, X^{\text{RX}}). \quad (3.83)$$

Для стандарта IEEE 802.15.4 известно, что при отношении сигнал/шум хуже -5 дБ ($-5 \text{ дБ} \approx 0.32$), вероятность битовой ошибки превышает 0.1 [64]. В таких условиях приём сообщений, содержащих несколько десятков байт, теряет смысл. Поэтому условие для оповещения узла о начале приёма сообщения сформулируем так:

$$\kappa > 0.32. \quad (3.84)$$

Итак, узел оповещается о начале приёма сообщения при одновременном выполнении условий (3.79), (3.81) и (3.84):

$$\rho = (P^{\text{RX}} > P_i^{\text{RXmin}}) \wedge (F_i \neq F^{\text{выключен}} \wedge (V_i = V^{\text{RX}} \vee V_i = V^{\text{RXsleep}})) \wedge (\kappa > 0.32). \quad (3.85)$$

Оповещение узла о начале приёма сообщения не означает, что сообщение будет успешно принято. Передаваемая модели узла величина k используется при моделировании ошибок вследствие воздействия помех (см. раздел 3.4.9).

3.4. Автономная работа узла БСС

Алгоритмы автономной работы узлов определяются общей схемой их функционирования, вытекающей из рассмотренных в главе 2 положений.

3.4.1. Общая схема функционирования узлов БСС

В соответствии с рассмотренными выше основными положениями, определяющими класс БСС для космических систем, деятельность **измерителей** и **маршрутизаторов** организуется в соответствии со следующей схемой.

1. После включения и инициализации своих ресурсов узел, не владея информацией о расписании работы сети, находится в состоянии ожидания получения сетевой информации.
2. Процессор узла переводится в режим сна, трансивер переводится в режим приёма.
3. При поступлении сообщения по радио трансивер формирует сигнал прерывания, пробуждающий процессор. Процессор пробуждается и по завершении приёма сообщения анализирует его. Если это не сообщение с сетевой информацией, перейти к п. 2.
4. В оперативной памяти узла запоминаются адрес родителя, от которого принято сообщение с сетевой информацией, глубина, качество связи со шлюзом. Выполняется синхронизация часов узла с эталоном. Строится и запоминается расписание работы. Запускается виртуальный таймер для отсчёта интервала сбора альтернативных предложений. Обновляется сетевая информация. Иницируется ретрансляция обновлённого сообщения с сетевой информацией.
5. Процессор переводится в режим ожидания.

6. В случае поступления альтернативного сообщения с сетевой информацией до истечения интервала сравнивается глубина поступившего предложения с текущим значением. Если текущая глубина меньше, перейти к п. 5. Сравнивается качество связи со шлюзом из альтернативного предложения с текущим значением. Если текущее качество выше, перейти к п. 5.
7. Узел принимает альтернативное предложение, обновляя значения адреса родителя, глубины, качества связи со шлюзом. Обновляются параметры расписания работы.
8. По истечении интервала сбора альтернативных предложений узел определяет оставшееся до АФР время.
9. Узел запускает реальный таймер, который разбудит его, и переходит в состояние сна, переводя процессор и трансивер в режим сниженного потребления энергии.
10. По прерыванию от таймера узел пробуждается, его процессор и трансивер переходят в режим работы. Выполняются собственные измерения, результат которых заносится в буфер. Узел запускает виртуальный таймер перехода из режима только приёма сообщений в режим приёма и передачи.
11. Процессор переводится в режим ожидания.
12. При поступлении адресованного узлу сообщения с результатами измерений проверяется, не является ли это сообщение дубликатом ранее успешно обработанного. Если сообщение является дубликатом, то перейти к п. 11. Если сообщение не является дубликатом, результаты измерений помещаются в буфер. Перейти к п. 11.
13. По прерыванию от виртуального таймера узел переходит к режиму приёма и передачи сообщений.
14. Если буфер результатов заполнен на величину, соответствующую качеству связи с родителем, инициируется отправка буфера с результатами родителю. Отправленные результаты из буфера результатов удаляются. Если буфер не пуст, эти действия повторяются.

15. Если буфер результатов заполнен не более чем на величину, соответствующую качеству связи с родителем, запускается виртуальный таймер для отсчёта интервала сбора результатов измерений.
16. Процессор переводится в режим ожидания.
17. При поступлении адресованного узлу сообщения с результатами измерений, проверяется, не является ли это сообщение дубликатом ранее успешно обработанного. Если сообщение является дубликатом, то перейти к п. 16. Если сообщение не является дубликатом, результаты измерений помещаются в буфер. Перейти к п. 14.
18. По истечении интервала сбора результатов инициируется отправка буфера с результатами родителю. Буфер результатов очищается. Перейти к п. 16.
19. По истечении АФР, если в течение определённого интервала узел получил результаты измерений, АФР продлевается на заданную величину. Перейти к п. 14.
20. Узел вычисляет момент начала следующей АФС, запускает реальный таймер, который разбудит его, и переходит в состояние сна, переводя процессор и трансивер в режим сниженного потребления энергии.
21. По прерыванию от таймера узел пробуждается, его процессор и трансивер переходят в режим работы. Разбудив трансивер, процессор переходит в состояние сна. Запускается виртуальный таймер, измеряющий время нахождения узла в состоянии ожидания сетевой информации.
22. При поступлении сообщения по радио трансивер формирует сигнал прерывания, пробуждающий процессор. Процессор пробуждается и по завершении приёма сообщения анализирует его. Если это не сообщение с сетевой информацией, перейти к п. 21.
23. Если в течение установленного времени сообщения с сетевой информацией не поступило, вычислить момент начала следующей АФС, запустить реальный таймер, перейти в состояние сна со сниженным потреблением энергии. Перейти к п. 21.

Схема работы **шлюза**, отличающаяся от схемы работы измерителей и маршрутизаторов, представлена ниже.

1. После включения и инициализации своих ресурсов шлюз обнуляет показание своих часов и формирует сообщение с сетевой информацией.
2. Шлюз определяет момент начала своей АФР.
3. Шлюз инициирует передачу сетевой информации.
4. Шлюз запускает реальный таймер, который разбудит его, и переходит в состояние сна, переводя процессор и трансивер в режим сниженного потребления энергии.
5. По прерыванию от таймера шлюз пробуждается, его процессор и трансивер переходят в режим работы. Шлюз запускает виртуальный таймер окончания приёма результатов измерений.
6. При поступлении очередного результата измерений шлюз организует его пересылку в центр управления и обновляет статистические данные текущего периода работы.
7. По окончании АФР шлюз вычисляет момент начала АФС и на основании данных о максимальной глубине узлов определяет момент начала следующей АФР.
8. Шлюз запускает реальный таймер, который разбудит его, и переходит в состояние сна, переводя процессор и трансивер в режим сниженного потребления энергии.
9. По прерыванию от таймера шлюз пробуждается, его процессор и трансивер переходят в режим работы. Шлюз обнуляет показание своих часов, на основании собранных на предыдущих периодах работы статистических данных формирует сообщение с сетевой информацией и переходит к п. 3.

Диаграмма основных состояний измерителя и маршрутизатора показана на рис. 3.2. Диаграмма основных состояний шлюза показана на рис. 3.3. Заметим, что переход шлюза в состояние сна не обязателен, если он обеспечен сетевым

источником питания и для него снижение потребления энергии не является актуальным.

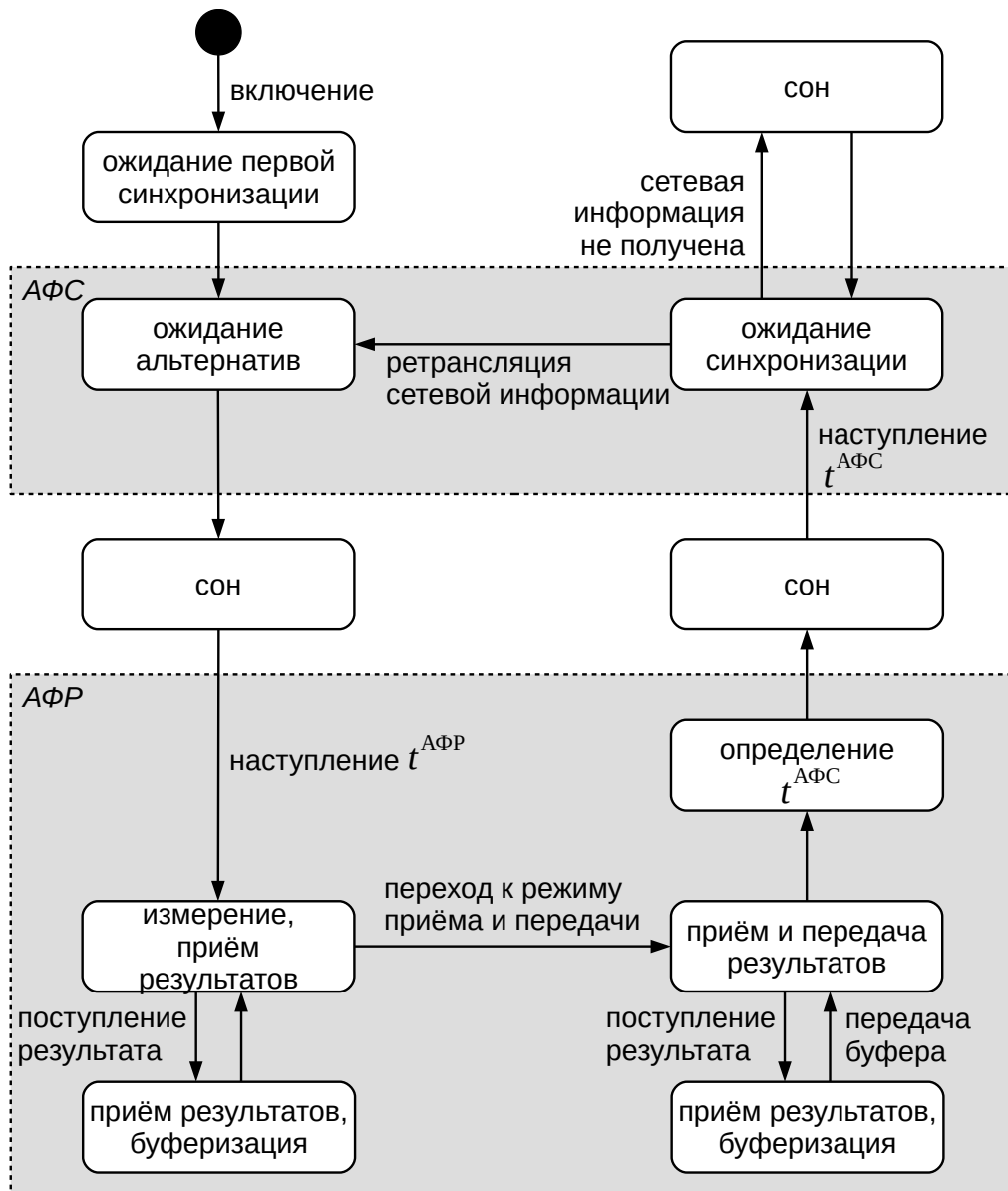


Рис. 3.2. Диаграмма основных состояний измерителя и маршрутизатора

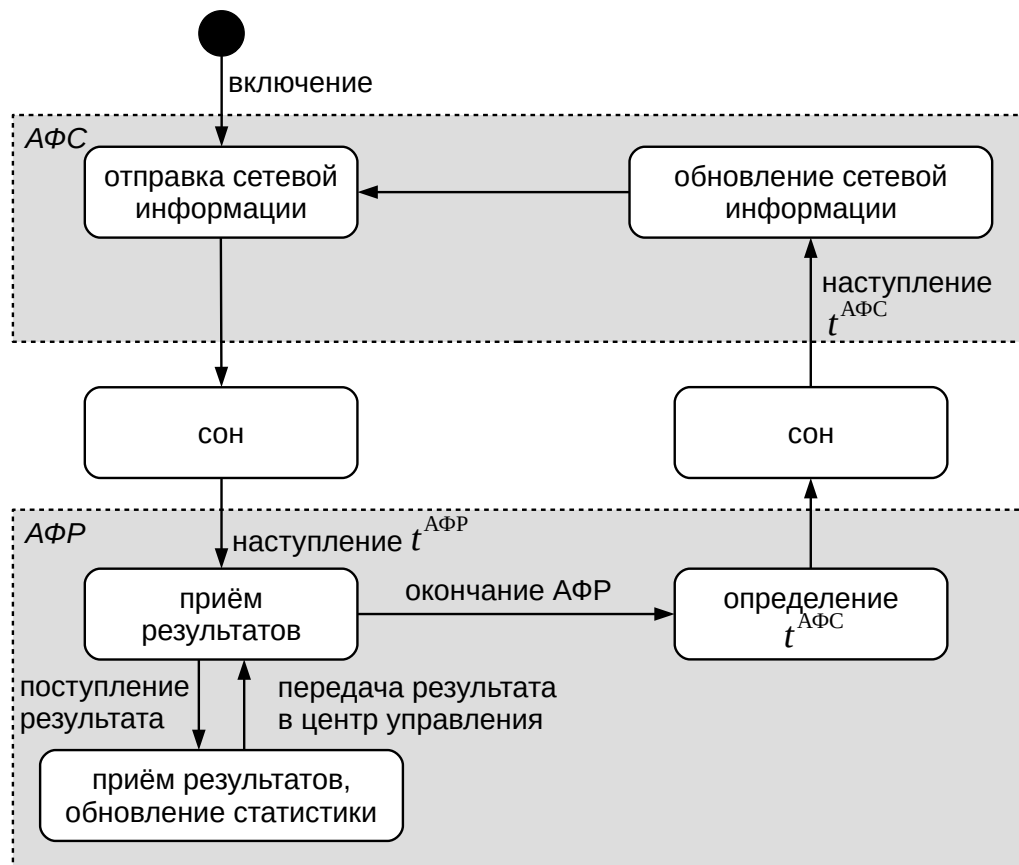


Рис. 3.3. Диаграмма основных состояний шлюза

3.4.2. Синхронизация

В соответствии с положением раздела 2.5 синхронизация заключается в обновлении показания собственных часов и в определении фактической скорости их дрейфа S . В результате синхронизации в часы узлов должно быть загружено эталонное значение. Начиная активную фазу, шлюз в соответствии с положением раздела 2.5 и общей схемой работы, изложенной в разделе 3.4.1, обнуляет показание своих часов и включает его в сетевую информацию для передачи другим узлам. Другие узлы сети (измерители) получают, обновляют и ретранслируют эталонную отметку времени, которой является момент синхронизации узла \hat{t}^S .

При поступлении на некоторый узел сообщения с сетевой информацией запоминается момент t_Γ начала его приёма, измеренный по собственным часам узла:

$$t_\Gamma = \text{clock}(t). \quad (3.86)$$

По окончании приёма сетевой информации определяется момент t_0 начала текущего периода работы:

$$t_0 = t_\Gamma - \hat{t}^S. \quad (3.87)$$

Заметим, что момент t_Γ измерен по собственным часам узла, а смещение синхронизации \hat{t}^S сформировано по часам других узлов. Однако вследствие малости скорости дрейфа часов узлов друг относительно друга мала и краткости интервала \hat{t}^S накопления ошибки отклонением t_0 от истинного значения можно пренебречь.

Исходя из моментов начала текущего t_0 и предыдущего t_{prev} периодов работы, определяемого аналогично выражению (3.87), может быть вычислена длительность T^f периода, измеренная по собственным часам узла:

$$T^f = t_0 - t_{\text{prev}}. \quad (3.88)$$

Но узлы выполняют синхронизацию собственных часов, загружая в них значение \hat{t}^S из сетевой информации (с поправкой t^Y на длительность трансляции и обработки сообщения, способ определения которой представлен в разделе 2.5). Это фактически означает, что началом отсчёта, соответствующим значению 0 в часах, является момент начала предыдущего периода работы, т. е.

$$t_{\text{prev}} \equiv 0. \quad (3.89)$$

Поэтому

$$T^f = t_\Gamma - \hat{t}^S. \quad (3.90)$$

По окончании приёма сетевой информации происходит синхронизация часов узла с эталонным временем, заключающаяся в загрузке в них значения момента синхронизации с поправкой:

$$\text{clock}(t) := \hat{t}^S + t^Y. \quad (3.91)$$

Далее вычисляется коэффициент дрейфа S :

$$S = T^f / T . \quad (3.92)$$

Вычисленный коэффициент дрейфа в дальнейшем используется для внесения поправок в величину интервала, отмеряемого по локальным часам. Если требуется отмерить некоторый интервал t , то при создании виртуального таймера его величина будет умножена на этот коэффициент, и использовано значение tS . Везде далее при планировании работы узла такая коррекция подразумевается.

3.4.3. Планирование работы узла

Задача schedule построения расписания работы Q узла БСС определена выражением (3.32). В соответствии с (3.33) определению подлежат $t^{\text{АФР}}$ и $\tau^{\text{АФР}}$ текущего периода работы и время начала $t^{\text{АФС}}$ следующего периода. Расписание строится вслед за выполнением указанных в разделе 2.5 действий по синхронизации узла с родителем.

Определение параметров $t^{\text{АФС}}$, $t^{\text{АФР}}$ и $\tau^{\text{АФР}}$ (см. рис. 2.7) основано на параметрах работы БСС, принятой сетевой информации и положении узла в топологии сети.

Начало АФР. Момент собственного пробуждения узла для начала АФР определяется моментом начала АФР родителя, смещением АФР потомка и величиной защитного интервала. Этот момент вычисляется следующим образом:

$$t^{\text{АФР}} = \hat{t}^{\text{АФР}} - \phi_{11} - \phi_7 . \quad (3.93)$$

Продолжительность АФР. Минимальная продолжительность АФР устанавливается параметром ϕ_9 . Фактическая продолжительность АФР определяется поступлением адресованных узлу сообщений и при необходимости продлевается один или более раз на величину ϕ_{10} . Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 3.4.7.6.

Начало следующей АФС. При определении момента начала АФС следующего периода работы учитывается 1) возможность перемещения узла и вызванного перемещением изменения глубины и 2) погрешность собственных

часов, чтобы они не приводили к пропуску сообщения с сетевой информацией. Абсолютный момент пробуждения $t^{\text{АФС}}$ определяется так, чтобы узел был готов принять сообщение с сетевой информацией от любого другого узла сети, в том числе от шлюза.

Поэтому

$$t^{\text{АФС}} = T - \phi_7, \quad (3.94)$$

т. е. узел должен проснуться чуть ранее начала следующего периода работы.

В случае, если в соответствии с положением, изложенным в разделе 2.3, при поступлении альтернативного предложения происходит обновление адреса родителя, и новая глубина получается меньше ранее определённой, параметры расписания должны быть обновлены для учёта возможного изменения параметров АФР родителя.

3.4.4. Расход энергии

Задача discharge, моделирующая расход узлом БСС запаса энергии ИП, поставлена выражением (3.35). Остаточный запас энергии узла уменьшается по мере его расходования аппаратурой. В момент времени t его величина определяется выражением

$$E(t) = E_0 - \int_0^t I(\tau) U(\tau) d\tau, \quad (3.95)$$

где $I(\tau)$ — сила электрического тока, потребляемого узлом в момент времени τ , изменяющаяся вместе с изменением режима работы узла, $U(\tau)$ — напряжение ИП в момент времени τ , изменяющееся по мере разряда ИП. В узлах БСС применяются преобразователи постоянного напряжения (например, TPS61025 компании Texas Instruments [106]), компенсирующие снижение напряжения ИП по мере его разряда за счёт увеличения потребления тока. Применение преобразователя постоянного напряжения позволяет считать напряжение ИП постоянным. Игнорируя потери энергии, связанные с применением преобразователя, выражение (3.95) может быть записано в виде

$$E(t) = E_0 - U \int_0^t I(\tau) d\tau, \quad (3.96)$$

где U — напряжение, поддерживаемое преобразователем постоянного напряжения.

Далее будем рассматривать различные режимы работы узла, полагая неизменным ток потребления в течение времени нахождения узла в том или ином режиме работы. Включение или выключение компонентов узла, изменяющее величину потребляемого электрического тока, будем ассоциировать со сменой режима работы узла.

В начале моделирования запас энергии узлов устанавливается равным E_0 :

$$E := E_0, \quad (3.97)$$

где операция «:=» означает «присваивание». При каждой смене режима работы компонентов узла происходит вычисление тока потребления узла в «старом» режиме:

$$I = I_{\text{MCU}} + I_{\text{TRX}} + I_{\text{sensors}}, \quad (3.98)$$

где I_{MCU} — ток потребления микропроцессора, I_{TRX} — ток потребления трансивера, I_{sensors} — ток потребления датчиков. В зависимости от «старого» режима работы V эти токи определяются следующим образом:

$$I_{\text{MCU}} = \left\{ \begin{array}{ll} I_{\text{MCU}}^{\text{sleep}}, & \text{если микропроцессор спит} \\ I_{\text{MCU}}^{\text{work}}, & \text{если микропроцессор работает} \end{array} \right\}, \quad (3.99)$$

$$I_{\text{TRX}} = \left\{ \begin{array}{ll} I_{\text{TRX}}^{\text{sleep}}, & \text{если трансивер спит} \\ I_{\text{TRX}}^{\text{RX}}, & \text{если трансивер находится в режиме приёма} \\ I_{\text{TRX}}^{\text{TX}}, & \text{если трансивер находится в режиме передачи} \end{array} \right\}, \quad (3.100)$$

$$I_{\text{sensors}} = \left\{ \begin{array}{ll} I_{\text{sensors}}^{\text{sleep}}, & \text{если датчики узла спят} \\ I_{\text{sensors}}^{\text{work}}, & \text{если датчики узла работают} \end{array} \right\}. \quad (3.101)$$

Таким образом

$$I = \left. \begin{array}{l} I_{MCU}^{sleep} + I_{TRX}^{sleep} + I_{sensors}^{sleep}, \quad V = V^{sleep} \\ I_{MCU}^{work} + I_{TRX}^{TX} + I_{sensors}^{sleep}, \quad V = V^{TX} \\ I_{MCU}^{work} + I_{TRX}^{RX} + I_{sensors}^{sleep}, \quad V = V^{RX} \\ I_{MCU}^{work} + I_{TRX}^{RX} + I_{sensors}^{work}, \quad V = V^{RXsense} \\ I_{MCU}^{sleep} + I_{TRX}^{RX} + I_{sensors}^{sleep}, \quad V = V^{RXsleep} \end{array} \right\}. \quad (3.102)$$

Расход энергии e за время нахождения узла в таком режиме работы:

$$e = U I \tau, \quad (3.103)$$

где τ — продолжительность работы узла в «старом» режиме. Затем происходит обновление величины остаточного запаса энергии:

$$E := E - e. \quad (3.104)$$

Если остаточный запас энергии некоторого узла Θ_i стал нулевым или меньше нуля, то изменяется роль узла

$$F_i := F^{выключен}, \quad (3.105)$$

и узел больше не принимает участия в работе сети. Одновременно выключенный узел заносится в множество выключенных узлов W^{off} , являющееся одним из компонентов диагностических данных:

$$W^{off} := W^{off} \cup \Theta_i. \quad (3.106)$$

3.4.5. Диспетчеризация

Задача диспетчеризации работы узла *dispatch* поставлена выражением (3.34). Она заключается в своевременной смене состояния узла и запуске соответствующих состоянию действий в соответствии с общей схемой работы, см. раздел 3.4.1. При имитационном моделировании изменение режима работы узла запоминается, и в соответствии с (3.102), (3.103) и (3.104) происходит обновление величины остаточного запаса энергии E . Далее в тексте работы об обновлении запаса энергии больше явно не говорится, но всех случаях, когда упоминается изменение состояния узла, происходит обновление остаточной величины запаса энергии ИП. Это является одним из аспектов моделирования, позволяющим определить долговечность как отдельных узлов, так и БСС в целом.

3.4.6. АФС: участие узла в формировании пространственно-временной структуры взаимодействия

В момент времени, определённый с помощью выражения (3.94), узел просыпается и начинается АФС. Состояние узла изменяется с V^{sleep} на V^{RXsleep} , так как проснувшись, узел немедленно включает трансивер для ожидания получения сообщения с сетевой информацией, а микропроцессор узла снова переводит в режим сна.

Распределённая структура взаимодействия Ψ заново строится узлами на АФС каждого периода работы продолжительностью T . Построение структуры взаимодействия начинается с передачи шлюзом широковещательного сообщения с сетевой информацией Γ (3.29). Начиная очередной период работы, шлюз помещает в поле $\hat{t}^{\text{АФР}}$ величину φ , доводя до остальных узлов сети важный параметр расписания работы.

Алгоритм основных действий узла на АФС приведён на рис. 3.4.

При приёме сообщения с сетевой информацией процессор пробуждается, режим работы узла изменяется на V^{RX} . Приняв сетевую информацию, узел запоминает адрес её отправителя в качестве родителя

$$A^p = \hat{A}, \quad (3.107)$$

выполняет синхронизацию (см. раздел 3.4.2), строит расписание своей работы Q (см. раздел 3.4.3), модифицирует сетевую информацию и ретранслирует сообщение далее. Вклад каждого из узлов в построение структуры взаимодействия Ψ заключается в запоминании адреса своего родителя в топологии сети.

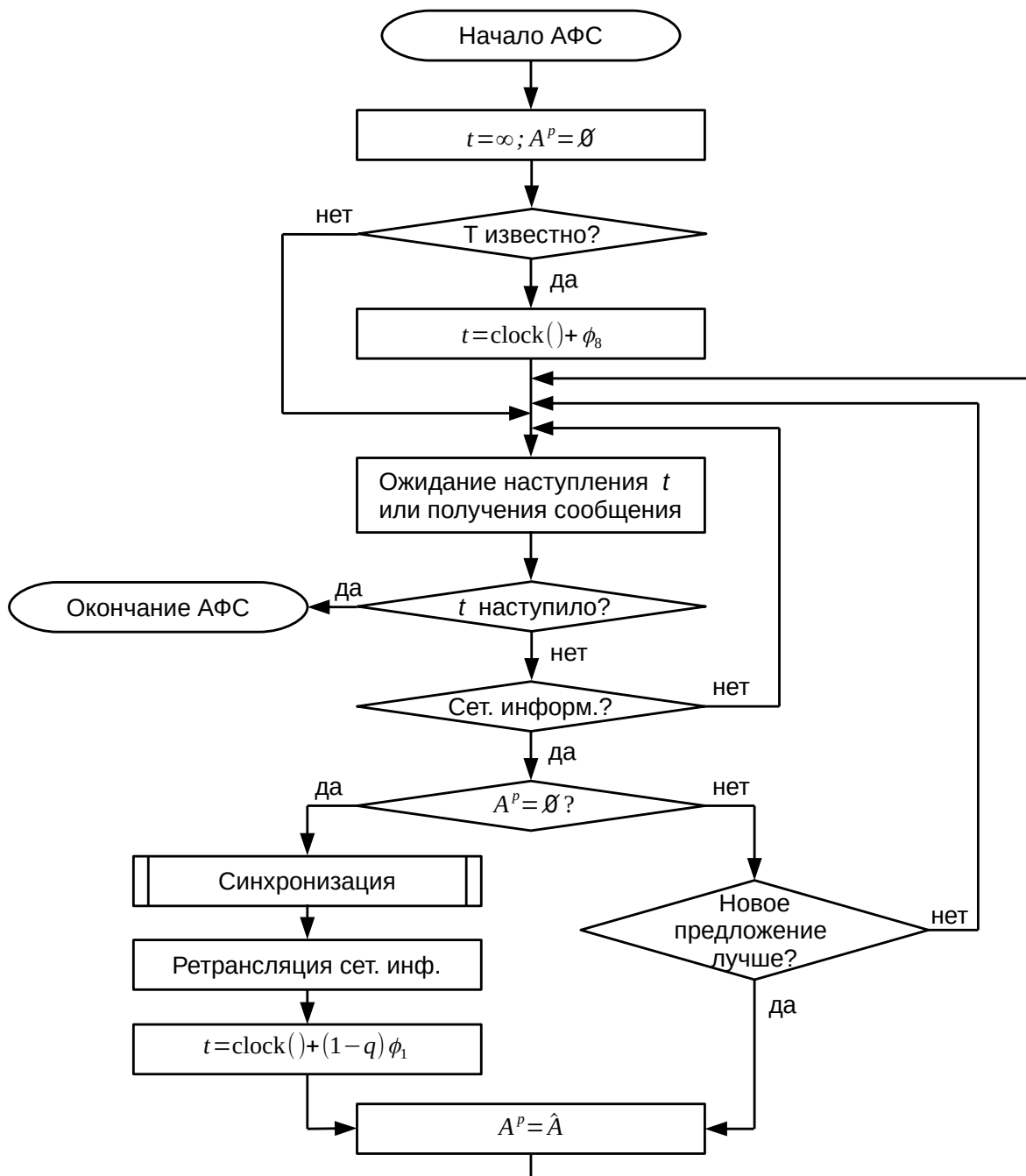


Рис. 3.4. Алгоритм работы узла на АФС

Модификация и ретрансляция сетевой информации. Для обеспечения корректного построения потомками данного узла своего расписания работы происходит модификация сетевой информации, заключающаяся в выполнении следующих действий.

1. Адрес отправителя заменяется собственным адресом A .

2. Смещение момента синхронизации обновляется: к полученному значению прибавляется t^X — длительность обработки сообщения и фактической задержки доступа к каналу w на данном узле

$$t^S = \hat{t}^S + t^X, \quad (3.108)$$

см. рис. 3.5. Величина t^X измеряется как интервал времени между прерыванием по началу приёма сообщения с сетевой информацией и прерыванием по началу передачи собственного сообщения с сетевой информацией.

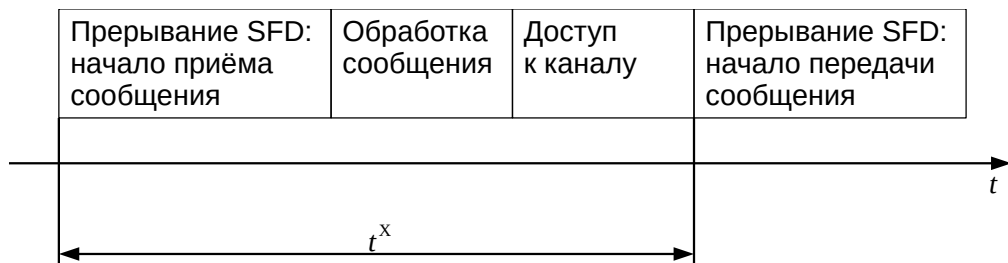


Рис. 3.5. Схема измерения t^X

3. Значение $\hat{t}^{AФP}$ заменяется на $t^{AФP}$, ранее вычисленное при построении расписания работы узла. Глубина k увеличивается на 1:

$$k = \hat{k} + 1. \quad (3.109)$$

4. Обновляется качество связи со шлюзом:

$$q = \hat{q} p^{LQI}, \quad (3.110)$$

где p^{LQI} — вероятность доставки сообщения эталонной длины, рассчитанная на основании предоставленного трансивером значения индикатора качества связи LQI при приёме сетевой информации от узла с адресом \hat{A} .

На время ретрансляции сообщения сообщения с сетевой информацией режим работы узла принимает значение V^{TX} .

Не получивший сетевую информацию узел. Если по каким-либо причинам некоторый узел Θ_i не получил сообщения с сетевой информацией, то ему не известен адрес родителя в структуре взаимодействия. В этом случае

$A_i^p = \emptyset$. В работе сети на АФР такой узел участия не принимает. Этот факт отражается в диагностической информации:

$$W^{\text{out}} := W^{\text{out}} \cup \Theta_i. \quad (3.111)$$

Дальнейшее поведение такого узла зависит от того, принимал ли он ранее участие в работе сети. Если узел был только что включён, то ему ещё ни разу не поступала сетевая информация, и потому ему не известно, когда её поступления ожидать. В таком случае узел должен оставаться в режиме V^{RXsleep} до тех пор, пока не получит сетевую информацию Γ .

Если узел ранее получал хотя бы одно сообщение с сетевой информацией, ему известна периодичность работы узлов сети — T . В этом случае узел с целью экономии расхода энергии ИП проводит в состоянии ожидания приёма сообщения с сетевой информацией ограниченное время. Продолжительность такого ожидания задаётся параметром ϕ_8 . Величина этого параметра выбирается при проектировании БСС и определяется, в том числе, предельной глубиной узлов и ожидаемым уровнем конкуренции за радиоканал. Переходя в сон, такой узел для определения момента начала следующей АФС вместо (3.94) использует следующее выражение

$$t^{\text{АФС}} = T - (1 + k_{\text{out}}) \phi_7, \quad (3.112)$$

где k_{out} — счётчик числа периодов, в течение которых узел не принимал сообщения синхронизации. При получении каждого сообщения синхронизации счётчик k_{out} обнуляется.

Структура взаимодействия. Таким образом формируется структура взаимодействия в виде упорядоченных пар (A, A^p) , где A^p — родитель узла с адресом A . Структура взаимодействия существует не всегда, а только начиная с её построения на АФС и заканчивая окончанием АФР:

$$\Psi(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \{(A_i, A_i^p), 1 \leq i \leq N\}, & t_{\text{АФС}} \leq t - (n-1)T \leq t_{\text{АФР}} + \tau_{\text{АФР}} \\ \emptyset, & \text{иначе} \end{array} \right\}, \quad (3.113)$$

где $t_{АФС}$ — момент начала АФС на узле с адресом A_i , $t_{АФР}$ — момент начала АФР на узле с адресом A_i , $\tau_{АФР}$ — продолжительность АФР на узле с адресом A_i , n — порядковый номер периода работы сети. Построенная на АФС структура взаимодействия будет использована на АФР для ретрансляции результатов измерений.

Ожидание альтернативных предложений. В соответствии с положением, изложенным в разделе 2.3 и общей схемой работы, после поступления сетевой информации узел начинает отсчёт интервала ожидания альтернативных предложений с сетевой информацией. Если до истечения этого интервала узел получит альтернативное сообщение Γ_{alt} , то оно может быть принято в случае, если глубина из альтернативного предложение не больше глубины ранее принятого предложения, а качество связи со шлюзом лучше, чем у принятого предложения:

$$\hat{k}_{alt} \leq \hat{k} \quad (3.114)$$

и

$$\hat{q}_{alt} p_{alt}^{LQI} > \hat{q} p^{LQI}, \quad (3.115)$$

где \hat{k}_{alt} , \hat{q}_{alt} и p_{alt}^{LQI} — параметры альтернативного предложения.

При принятии альтернативного предложения обновлённое сообщение с сетевой информацией повторно не рассылается. Если в результате принятия альтернативного предложения глубина узла уменьшилась, то значение выражения (3.93) должно быть вычислено заново.

С одной стороны, длительное ожидание без перехода в сон узлов с высоким текущим качеством связи со шлюзом бесполезно. С другой стороны, недостаточное ожидание может привести к преждевременному окончанию АФС, неполучению предложения с более высоким качеством связи и, следовательно, к ошибкам при передаче результатов измерений. Поэтому величину интервала сбора альтернативных предложений узлы определяют самостоятельно, в зависимости от текущего качества связи со шлюзом: чем выше качество связи со шлюзом, меньше

вероятность получения предложения с более высоким качеством связи. Следовательно, тем короче должен быть интервал приёма альтернативных предложений. Поэтому продолжительность t_{alt} ожидания альтернативных предложений определяется следующим образом:

$$t_{alt} = (1 - q) \phi_1, \quad (3.116)$$

где ϕ_1 — максимальный интервал ожидания, см. табл. 3.2.

Интервал ожидания альтернативных предложений отсчитывается с момента приёма первого сообщения с сетевой информацией и не может быть продлён при поступлении лучших по качеству связи со шлюзом сообщений. Если этот интервал истёк, но сообщение с сетевой информацией ещё не было ретранслировано, узел откладывает переход в сон до окончания ретрансляции.

3.4.7. АФР: участие узла в сборе результатов измерений

В момент времени, определённый с помощью выражения (3.93), узел просыпается и начинается АФР. Состояние узла изменяется с V^{sleep} на $V^{RXsense}$, так как проснувшись, узел немедленно включает трансивер для приёма результатов измерений своих потомков, а датчики выполняют собственные измерения узла.

3.4.7.1 Буфер сообщений

Для хранения результатов в оперативной памяти узла создаётся буфер, представляющий собой множество сообщений:

$$Buffer = \{(Data_i), 1 \leq i \leq n^{msg}\}, \quad (3.117)$$

где $Data_i$ — данные сообщения, n^{msg} — количество сообщений. Состав данных сообщения:

$$Data = (A, s, Bytes), \quad (3.118)$$

где A — адрес узла, выполнившего измерения, s — размер измерений в байтах, см. табл. 3.1, $Bytes$ — массив байтов измерения.

В начале АФР в буфер заносится результат собственного измерения. Кроме буфера сообщений в памяти узла хранится атрибут — максимальная глубина \bar{k} узла, результаты измерений которого попали на данный узел в текущем периоде работы. При синхронизации этому атрибуту присваивается значение текущей глубины:

$$\bar{k} := k. \quad (3.119)$$

Этот атрибут обновляется при поступлении новых результатов измерений и пересылается родителю вместе с буфером.

3.4.7.2 Предотвращение передачи дубликатов сообщений

В соответствии с положением, изложенным в разделе 2.8, для всех поступающих узлу сообщений выполняется проверка, не является ли поступившее сообщение дубликатом ранее принятого. Для этой цели узлом ведётся список *Recent* последних успешно принятых сообщений. Количество m элементов этого списка определяется параметром функционирования БСС ϕ_2 :

$$m = 2^{\phi_2}. \quad (3.120)$$

В начале АФР этот список очищается. Проверка на дубликат для сообщения, поступившего от узла с адресом A и имеющего порядковый номер $SeqNo$, заключается в вычислении значения признака

$$\delta^d = \begin{cases} 1, & \exists (A, SeqNo) \in Recent \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (3.121)$$

Если $\delta^d = 1$, то принятое сообщение является дубликатом и должно быть проигнорировано. Если сообщение дубликатом не является, оно обрабатывается, а адрес его отправителя и порядковый номер заносятся в список *Recent*:

$$Recent := (A, SeqNo) \cup Recent(1) \cup \dots \cup Recent(m-1), \quad (3.122)$$

где $Recent(i)$ — операция извлечения i -го элемента из списка *Recent*.

3.4.7.3 Накопление результатов в буфере сообщений

До наступления момента времени $\hat{t}^{\text{АФР}}$ узел только принимает результаты измерений, накапливая их в своей памяти, так как до этого момента времени его родитель в топологии спит:

$$\text{Buffer} := \text{Buffer} \cup (A^r, s^r, \text{Bytes}^r), \quad (3.123)$$

где A^r , s^r , Bytes^r — адрес узла, выполнившего измерения, размер и данные измерения соответственно. Одновременно обновляется атрибут \bar{k} :

$$\bar{k} := \max(\bar{k}, \bar{k}^r), \quad (3.124)$$

где \bar{k}^r — атрибут максимальной глубины из принятого сообщения.

По окончании выполнения собственных измерений их результат заносится в буфер результатов также при помощи операции (3.123).

3.4.7.4 Случайная задержка результата

С целью снижения конкуренции за радиоканал потомками одного узла, одновременно получившими сообщение с сетевой информацией, в соответствии с положением, изложенным в разделе 2.9, передача первого сообщения с результатами предваряется задержкой случайной величины. Закон распределения величины СЗР d — равномерный, так как целью СЗР является равномерное распределение отправок сообщений по интервалу. Нижней границей интервала равномерного распределения является 0, верхняя граница задаётся параметром метода функционирования БСС ϕ_3 . Таким образом,

$$d \sim U(0, \phi_3). \quad (3.125)$$

Предельное количество повторных попыток отправки сообщения, т. е. настойчивость на сетевом уровне, определяется параметром ϕ_4 .

3.4.7.5 Буферизация сообщений, управляемая качеством связи

При наступлении момента времени $\hat{t}^{\text{АФР}}$ узел начинает передачу накопленных в буфере данных. В соответствии с положением, изложенным в

разделе 2.10, предельный размер сообщения s^{limit} в этом случае определяется качеством связи данного узла с его родителем в топологии. Рассмотрим, как выбирается конкретное значение s^{limit} в зависимости от текущего качества связи узла с родителем и заданной вероятности доставки сообщения.

Введём следующие обозначения: h — размер заголовка сообщения в битах, s — размер сообщения, состоящего из заголовка и результатов измерений в битах, n — количество результатов измерения в сообщении, s_i — размер результата измерения с номером i в битах, s^{max} — предельный размер сообщения в битах, определённый стандартом IEEE 802.15.4, b — вероятность битовой ошибки, т. е. вероятность ошибки при передаче одного бита, p_1 — вероятность успешной передачи сообщения при одной попытке отправки, m — количество попыток отправки сообщения, предусмотренное стандартом IEEE 802.15.4, p_m — вероятность успешной передачи сообщения с использованием m попыток отправки, \hat{p} — вероятность успешной пересылки сообщения, которая должна быть обеспечена, r — заданное значение SINR.

Тогда длина сообщения, передающего буфер из n результатов измерений, составляет в битах

$$s = h + \sum_{i=1}^n s_i. \quad (3.126)$$

При этом должно быть выполнено условие

$$s \leq s^{\text{max}}. \quad (3.127)$$

При передаче сообщений в БСС стандарта IEEE 802.15.4 (диапазон 2400 МГц) используется метод модуляции O-QPSK, поэтому вероятность битовой ошибки в зависимости от SINR определяется выражением [64]

$$b(r) = \frac{1}{30} \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{20r(\frac{1}{k}-1)}. \quad (3.128)$$

График этой зависимости приведён на рис. 3.6.

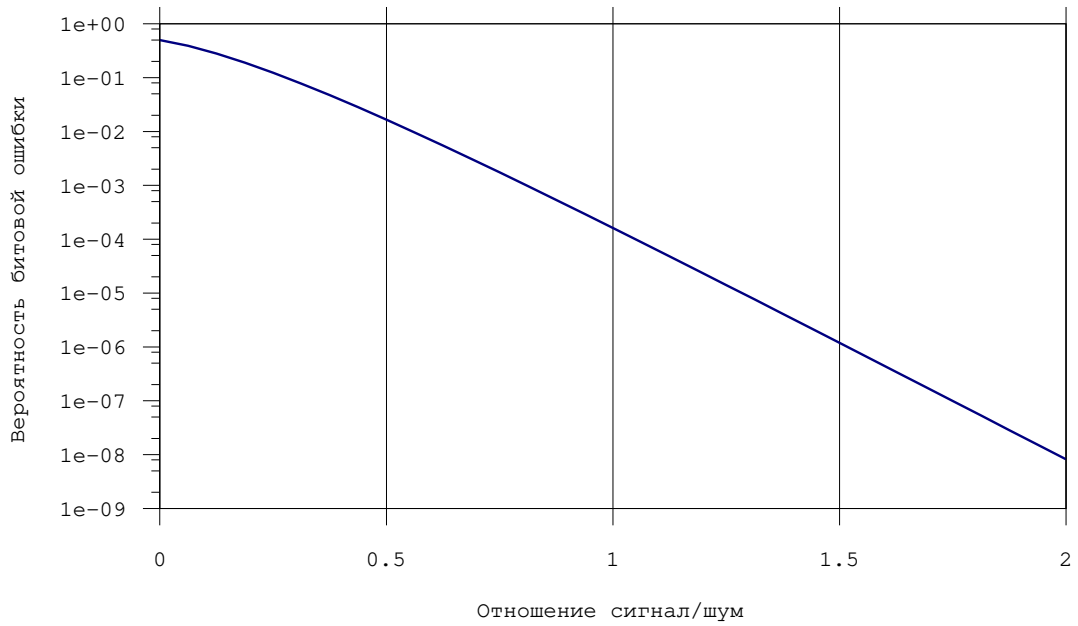


Рис. 3.6. Зависимость вероятности битовой ошибки от SINR

Вероятность успешной доставки сообщения размером s битов с использованием одной попытки:

$$p_1 = (1 - b)^s. \quad (3.129)$$

Вероятность того, что сообщение будет доставлено при помощи не более m попыток, составляет

$$p_m = 1 - (1 - p_1)^m = 1 - (1 - (1 - b)^s)^m. \quad (3.130)$$

Условие обеспечения вероятности доставки не хуже заданной:

$$p_m \geq \hat{p}. \quad (3.131)$$

После подстановки (3.130) в (3.131) и преобразований получаем

$$s \leq \log_{(1-b)} \left(1 - (1 - \hat{p})^{\frac{1}{m}} \right). \quad (3.132)$$

Выражение (3.132) определяет верхний предел длины сообщения, которое будет успешно доставлено за m попыток с вероятностью \hat{p} при определённой с помощью (3.128) вероятности битовой ошибки b в зависимости от SINR r . Т. е.

$$s^{\text{limit}} = \log_{(1-b)} \left(1 - (1 - \hat{p})^{\frac{1}{m}} \right). \quad (3.133)$$

Требуемая вероятность \hat{p} задаётся параметром работы ϕ_6 . Метод реализации вычислений s^{limit} исходя из ϕ_6 на узлах БСС приведён в разделе 5.4.5.

При получении результатов узел не ждёт заполнения буфера до значения s^{limit} бесконечно. Во избежание слишком долгого ожидания очередного результата от потомка при каждом получении результата запускается виртуальный таймер, ограничивающий ожидание. Получение очередного результата приводит к перезапуску этого таймера. При срабатывании таймера отправляется очередная порция полученных результатов, даже если её размер меньше s^{limit} . Предельная продолжительность буферизации устанавливается параметром ϕ_5 .

Результаты измерений выбираются из буфера для передачи родителю в топологии, начиная с начала буфера. Для отправки родителю из буфера выбирается такое количество сообщений n , суммарный размер которых не превосходит предельного размера:

$$\sum_{i=1}^n s_i^r \leq s^{\text{limit}}. \quad (3.134)$$

Множество *Messages* выбранных для передачи сообщений:

$$\text{Messages} := \{(Data_i), 1 \leq i \leq n\}. \quad (3.135)$$

Выбранные результаты исключаются из буфера:

$$\text{Buffer} := \text{Buffer} \setminus \text{Messages}. \quad (3.136)$$

На время передачи сообщений родителю режим работы узла изменяется на V^{TX} .

3.4.7.6 Окончание АФР

Минимальная продолжительность второй активной фазы $\tau^{\text{АФР}}$ определяется параметром ϕ_9 . Во избежание преждевременного перехода узла в сон до получения всех адресованных ему сообщений в конце АФР особо выделяется интервал продолжительностью, определяемой параметром ϕ_{10} . Если на этом интервале узлу поступило хотя бы одно сообщение с результатами измерений, то

АФР продлевается ещё на величину параметра ϕ_{10} . При необходимости АФР может быть продлена нужное количество раз. Алгоритм определения фактической длительности АФР показан на рис. 3.7.

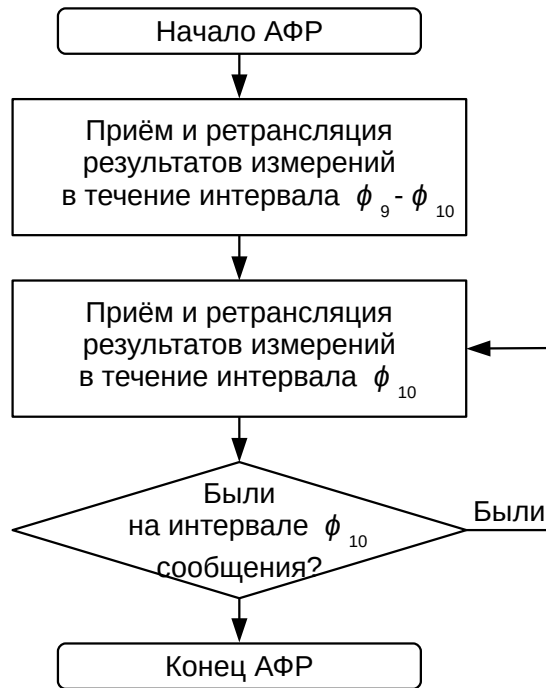


Рис. 3.7. Алгоритм определения длительности АФР

Поэтому

$$\tau^{\text{АФР}} = \phi_9 + m \phi_{10}, \quad (3.137)$$

где m — количество продлений АФР.

Если к моменту окончания АФР в буфере сообщений некоторого узла Θ_i остались непереданные далее сообщения, они включаются в диагностическую информацию данного узла:

$$W^i = \{ \Theta_j | \exists (A_j, s_j, Bytes_j) \in Messages \}. \quad (3.138)$$

Общее количество доставленных шлюзу на АФР результатов измерений n^S , используемое для вычисления текущего значения надёжности при помощи (3.15), определяется шлюзом, при этом появление среди результатов дубликатов значения n^S не увеличивает.

3.4.8. Получение доступа к каналу в условиях конкуренции

При передаче сообщений в БСС используется схема множественного доступа к каналу CSMA/CA, предусмотренная стандартом IEEE 802.15.4 [28]. Схема CSMA/CA существует в слотированной и неслотированной версиях. Слотированная версия применяется в сетях с маркерами. В сетях без маркеров, к которым относится и БСС для космических систем, используется неслотированная версия схемы CSMA/CA. Алгоритм работы этой версии представлен на рис. 3.8. Согласно этой схеме перед началом собственной передачи узел должен убедиться в том, что канал свободен.

Для этого узел выдерживает паузу случайной продолжительности, в общем случае тем большей, чем больше неуспешных попыток уже было сделано. Продолжительность паузы измеряется в *единичных паузах*, в диапазоне 2.4 ГГц стандарта IEEE 802.15.4 составляющих 320 мкс. После паузы узел оценивает состояние канала — выполняет процедуру CCA, см. (3.26). По результатам CCA узлы принимают решение о возможности начала собственной передачи сообщения: если $\delta=1$, то узел, успешно завершив CCA, приступает к передаче; если $\delta=0$, то узел увеличивает счётчик попыток BE , расширяя диапазон продолжительности случайной паузы, и переходит к началу CSMA/CA. Если за предельное число попыток $macMaxCSMABackoffs$ ⁸ не удалось обнаружить канал свободным, схема CSMA/CA завершается неуспешно. В этом случае узел может проявить настойчивость и попытаться вновь получить доступ к каналу при помощи CSMA/CA, см. рис. 2.9.

8 Значение этой константы определяется стандартом IEEE 802.15.4.

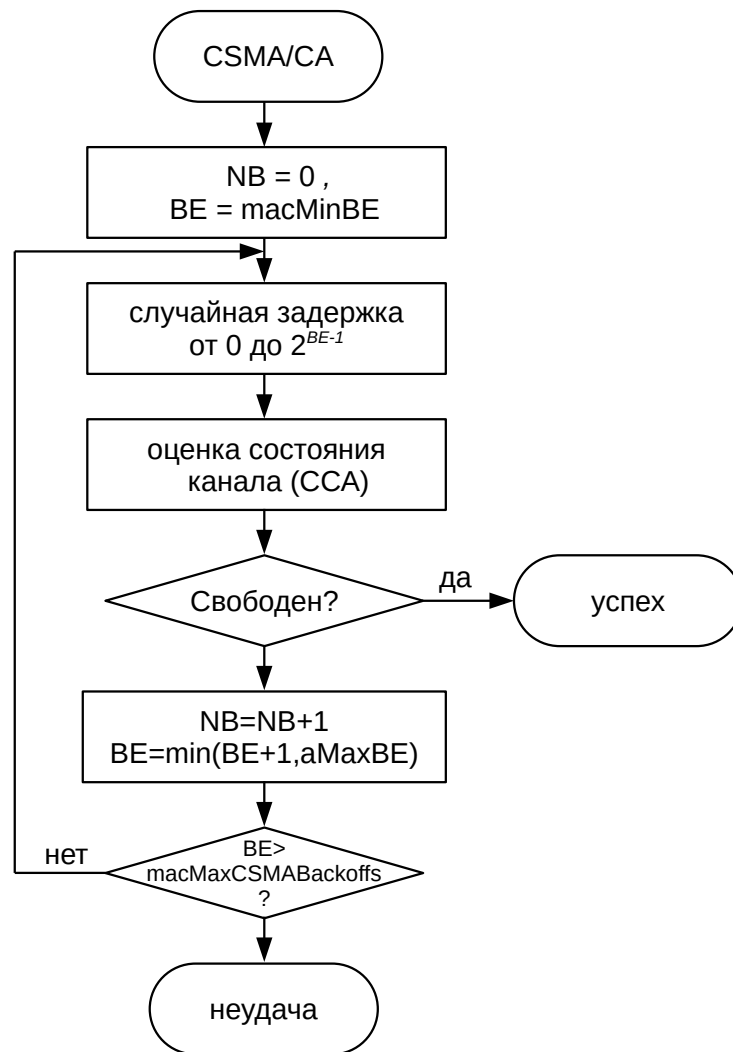


Рис. 3.8. Неслотованная схема CSMA/CA

3.4.9. Приём сообщения в условиях воздействия помех

На приём сообщения узлом влияют помехи и другие сообщения, передаваемые в канале. Чем выше уровень таких посторонних сигналов относительно уровня полезного сообщения, тем ниже вероятность успешного приёма этого сообщения. Задача RX определения значения этой вероятности поставлена выражением (3.39).

Для успешного приёма всего сообщения нужно, чтобы были успешно приняты все его сегменты. Вероятность успешного приёма сегмента с номером i зависит от вероятности битовой ошибки и размера сегмента. Поэтому

$$p = \prod_{i=1}^m (1 - b_i)^{8n_i}, \quad (3.139)$$

где m — количество сегментов сообщения, b_i — вероятность битовой ошибки при приёме сегмента, n_i — размер сегмента в байтах. Вероятность битовой ошибки зависит от отношения мощности сигнала к суммарной мощности помех и прочих сигналов, а также от вида модуляции. Для используемой в диапазоне 2.4 ГГц стандарта IEEE 802.15.4 модуляции O-QPSK вероятность $b_i(\kappa_i)$ вычисляется при помощи (3.128).

Найденное при помощи (3.128) и (3.139) значение вероятности успешного приёма всего сообщения используется при моделировании приёма сообщений. Для этого разыгрывается псевдослучайное число, равномерно распределённое на интервале от 0 до 1: $x \sim U(0,1)$. Признак r принимает значение 1, если сообщение успешно принято, и 0 в противном случае:

$$r = \begin{cases} 1, & x \leq p \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (3.140)$$

3.5. Выбор смещения АФР шлюза

В результате адаптивного управления работой сети, задача `initial_AFR` которого поставлена выражением (3.40), должен быть обеспечен минимально возможный (с определённым запасом) промежуток времени между АФС и АФР, т. е. между построением и использованием структуры взаимодействия. Следовательно, сокращение этого промежутка критически важно для объектов обслуживания с быстро изменяющейся конфигурацией.

Для сокращения этого промежутка должно быть уменьшено смещение АФР шлюза. Однако это сокращение может привести к тому, что некоторая часть узлов с большой глубиной не будет успевать выполнить и передать свои результаты измерений. Во избежание этого узлы снабжают шлюз сведениями о своей глубине. Шлюз выбирает среди них максимальное значение k_{\max} . Используя его, шлюз может вычислить необходимую величину смещения своей АФР:

$$\varphi = \phi_{11}(k_{\max} + \phi_{12}) + \phi_{13}, \quad (3.141)$$

где ϕ_{12} — запас по глубине узла, ϕ_{13} — запас времени на распространение сетевой информации от шлюза до узла максимальной глубины.

С целью сокращения объёма передаваемых по сети данных значения глубины отдельных узлов шлюзу не доставляются. Вместо отдельных значений шлюзу передаётся максимальная глубина буфера сообщений \bar{k} , см. раздел 3.4.7.1. Рекурсивная обработка содержащих \bar{k} сообщений на узлах БСС приводит к получению на шлюзе значения k_{\max} .

3.6. Определение долговечности БСС в целом

Задача определения долговечности БСС для космических систем в целом, сформулированная выражением (3.17), для своего решения требует набора данных Ξ с результатами периодов работы и заданного минимально допустимого значения надёжности R^{\min} . Набор Ξ состоит из n записей ξ_i , $1 \leq i \leq n$ вида

$$\xi_i = (n^S, W^{\text{off}}, W^{\text{out}}, \{W^j, 1 \leq j \leq N\}). \quad (3.142)$$

Одна запись ξ_i соответствует одному периоду работы БСС, следовательно, хранящаяся в ней информация относится к периоду работы T , закончившемуся в момент времени iT . Учитывая этот факт, на основании данных набора Ξ можно построить функцию $R(t)$, связывающую значения надёжности со временем их достижения. Сначала должен быть определён номер периода работы:

$$i = \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor, \quad (3.143)$$

где операция $\lfloor \cdot \rfloor$ означает округление до целого, не превосходящего значение аргумента. Затем для определённого при помощи (3.143) периода работы извлекается ξ_i и определяется надёжность:

$$R(t) = \frac{n_i^S}{n^A}. \quad (3.144)$$

Аналогично строится и функция $n^{\text{off}}(t)$, значение которой равно количеству узлов БСС, запас энергии ИП которых исчерпан:

$$n^{\text{off}}(t) = |W_i^{\text{off}}|. \quad (3.145)$$

Функции $R(t)$ и $n^{\text{off}}(t)$ изменяются ступенчато в моменты времени, кратные T .

Для заданного значения минимальной надёжности R^{min} в соответствии с определением (3.17) может быть найдена долговечность D . Однако в БСС для космических систем подвижны узлы, части объекта обслуживания и помехи. Поэтому может происходить временное снижение надёжности ниже допустимого минимума. Для различения этих двух случаев необходимо проанализировать поведение функции $n^{\text{off}}(t)$, см. рис. 3.9.

Если в момент времени t снижение надёжности БСС ниже R^{min} сопровождается увеличением количества исчерпавших запас энергии своего ИП узлов, то это свидетельствует о том, что достигнут предел долговечности сети: $D = t$. Этот случай показан на рис. 3.9.

Может оказаться так, что снижение долговечности ниже R^{min} обусловлено не только выходом узлов из строя, но и сложившейся конфигурацией объекта обслуживания. Однако и в этом случае можно полагать предел долговечности достигнутым, так как вслед за выходом из строя части узлов вскоре выйдут из строя и остальные (при условии, что все узлы изначально обладали одинаковым запасом энергии ИП).

Если снижение надёжности БСС ниже R^{min} не сопровождается увеличением количества исчерпавших запас энергии своего ИП узлов, то предел долговечности не достигнут, а снижение надёжности — временное. Так как надёжность БСС стала меньше минимально допустимой, должны быть внесены изменения в проект. Например, должно быть увеличено число маршрутизаторов, обеспечивающих связность сети при изменении конфигурации объекта обслуживания.

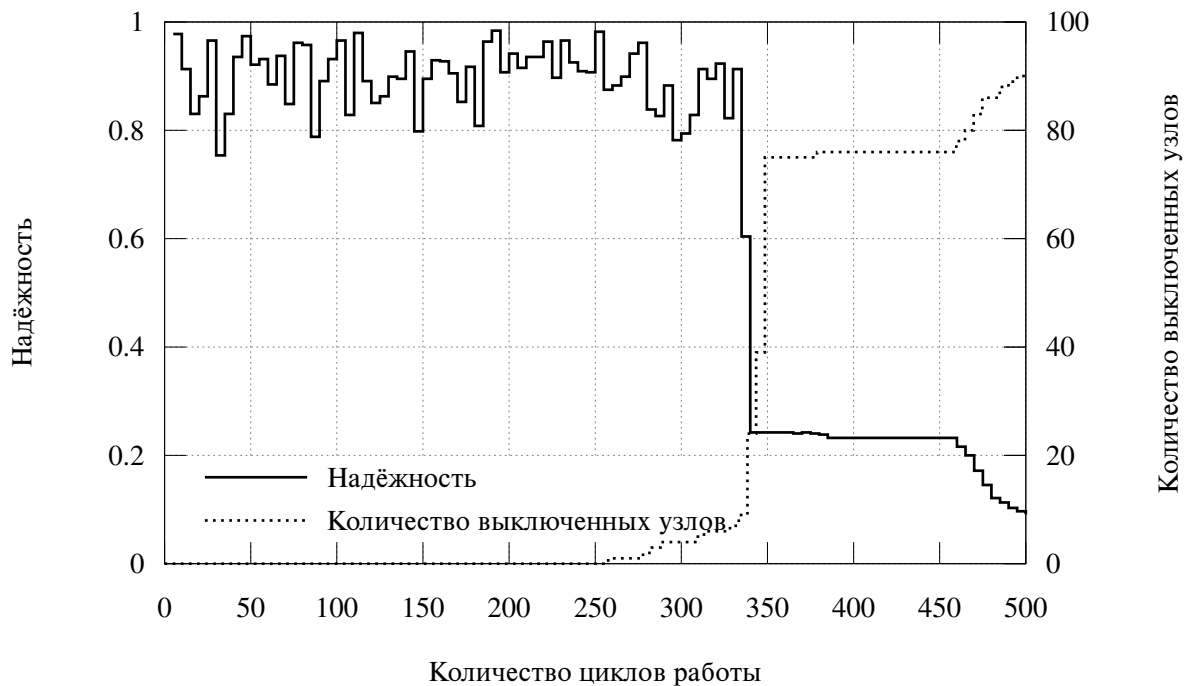


Рис. 3.9. Определение долговечности при помощи функций $R(t)$ и $n^{\text{off}}(t)$

Таким образом, долговечность БСС может быть определена при помощи следующего выражения:

$$D = \arg(R(t) | R(t) = R^{\min}, n^{\text{off}}(t) > n^{\text{off}}(t - \Delta t)), \quad (3.146)$$

где Δt — сколь угодно малая величина, $\Delta t > 0$.

Найденное значение долговечности должно быть использовано при определении необходимой периодичности замены ИП узлов.

В третьей главе работы построена модель класса БСС для космических систем и приведены алгоритмы автономной работы узлов БСС названного класса. Эта модель включает в себя модель радиоканала и модель узла БСС, функционирующего в соответствии с разработанными алгоритмами, основанными на сформулированных во второй главе положениях. Результатами имитационного моделирования являются:

- функция надёжности БСС в зависимости от времени,

- диагностическая информация, позволяющая определить причины недоставки результатов измерений в центр управления,
- расход энергии отдельными узлами и долговечность БСС.

Глава 4. Программное обеспечение имитационного моделирования БСС для космических систем

Практическая реализация БСС для космических систем связана с проведением исследований, направленных на выбор рациональных значений параметров модели БСС, разработанной в третьей главе. В настоящей главе рассмотрены вопросы, связанные с созданием программного обеспечения для проведения таких исследований — симулятора БСС для космических систем.

4.1. Вид моделирования

Ранее было отмечено, что процессы на узлах беспроводной сети развиваются параллельно, средой взаимодействия между узлами является радиоканал, между происходящими на различных узлах событиями имеются причинно-следственные связи, не все связи в модели могут быть выражены формулами, некоторые процессы и величины не детерминированы. Совокупность перечисленных обстоятельств вынуждает при моделировании работы БСС прибегнуть к имитационному моделированию.

В исследуемой БСС значения переменных изменяются мгновенно в некоторые моменты времени. Например, количество результатов измерений в буфере (см. раздел 3.4.6.3) изменяется скачкообразно в момент окончания приёма сообщения от потомка. Такую мгновенную смену состояния ассоциируют с *событием* [107]. В промежутках между событиями никаких изменений в модели не происходит. Все действия (смена состояния, инициирование других событий в будущем) происходят как реакция на происходящие события и выполняются в моменты наступления этих событий по шкале времени моделируемой системы. Следовательно, при моделировании промежутки времени между событиями игнорируются, а моделированию подвергается только обработка событий. Модель в этом случае строится как набор обработчиков всех возможных событий. Такой

вид моделирования с дискретным временем, основанный на обработке событий, называется *дискретно-событийным* [108].

Исследуемая БСС — децентрализованная система. Её поведение определяется действиями составляющих её узлов. В этом случае применим метод *агентного* моделирования [109], предполагающий детальную разработку автономного поведения отдельных объектов, в том числе правил их взаимодействия. Поведение системы в целом является следствием поведения множества составляющих её агентов. Агентное моделирование хорошо подходит для исследования самоорганизующихся систем [110].

Таким образом, исследование БСС должно выполняться при помощи имитационного моделирования с использованием методов дискретно-событийного и агентного моделирования.

4.2. Платформа для построения симулятора

Основной функцией симулятора, реализующего методы дискретно-событийного и агентного моделирования, являются обслуживание *очереди событий*. Эта очередь хранит уже запланированные, но ещё не произошедшие события, упорядоченные по моментам времени их наступления в неубывающем порядке. Новое событие добавляется в очередь, располагаясь в ней так, чтобы очередь оставалась упорядоченной. Это позволяет организовать работу симулятора в виде циклической выборки и обработки первого события из очереди, см. рис. 4.1. При обработке одних событий могут быть инициированы другие события. Симуляция завершается по исчерпанию событий в очереди или по достижении заданного момента времени моделируемой системы.

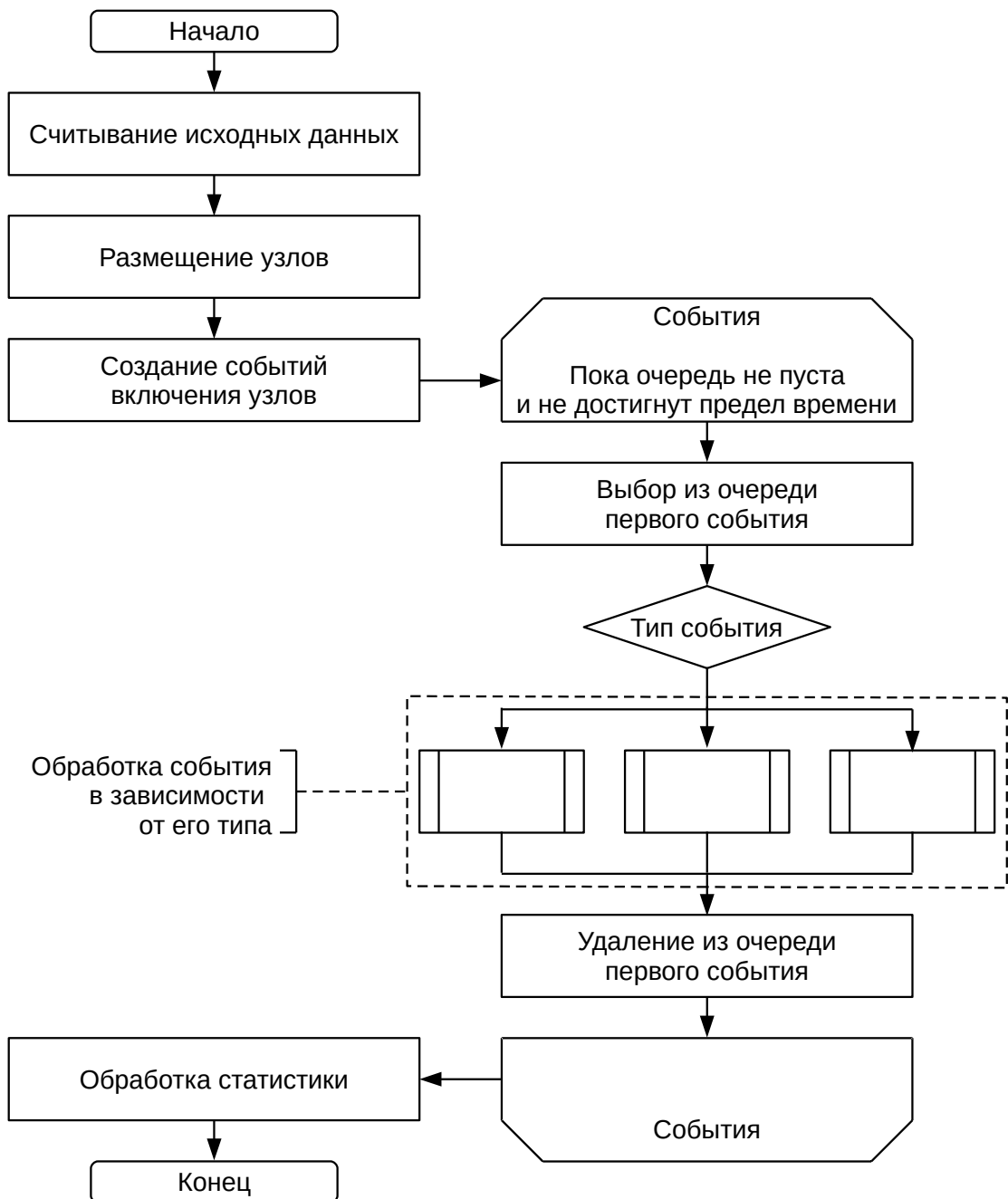


Рис. 4.1. Алгоритм работы симулятора

Объектами симулятора (агентами) в случае моделирования БСС являются части объекта обслуживания, помехи, узлы БСС и радиоканал. Вследствие изменения конфигурации части объекта обслуживания перемещаются, что вызывает перемещение помех и узлов БСС. Объект радиоканала служит для восприятия передач одних узлов БСС, см. (3.25а), и оповещения других о приёме

сообщений, см. (3.27). В своей работе объект радиоканала учитывает влияние помех и препятствий, которыми являются тела частей объекта обслуживания Ω .

В качестве платформы для построения симулятора БСС для космических систем был выбран симулятор сетей ns3 версии 27 — свободно распространяемое по лицензии GNU GPLv2 исследовательское программное обеспечение [111]. Алгоритм моделирования в ns3 полностью соответствует рис. 4.1. Выбор ns3 обусловлен двумя причинами: наличием в составе ns3 библиотеки готовых моделей и тем, что в ns3 модели оформляются в виде программ на языке C++. Наличие развитой библиотеки моделей, содержащей, в частности, модуль LrWrap, позволяющий строить модели БСС в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4, ускоряет работу над симулятором. Оформление моделей на языке C++ позволяет использовать программный код, разработанный для моделей узлов, при программировании реальной БСС с минимальными доработками, т. е. значительно ускоряет разработку программного обеспечения БСС.

В то же время ns3 не содержит некоторых необходимых для создания симулятора БСС для космических систем средств:

- возможность организации дискретного режима,
- модели помех,
- специфических моделей потерь при распространении радиоволн.

Следовательно, эти компоненты должны быть созданы отдельно.

4.3. Архитектура симулятора

Архитектура симулятора БСС для космических систем показана на рис. 4.2.

Симулятор включает в себя:

- ядро симуляции с очередью событий;
- модели радиоканала, измерителя и шлюза;
- подсистему ввода исходных данных;
- подсистему диагностической информации, статистики и журнала.

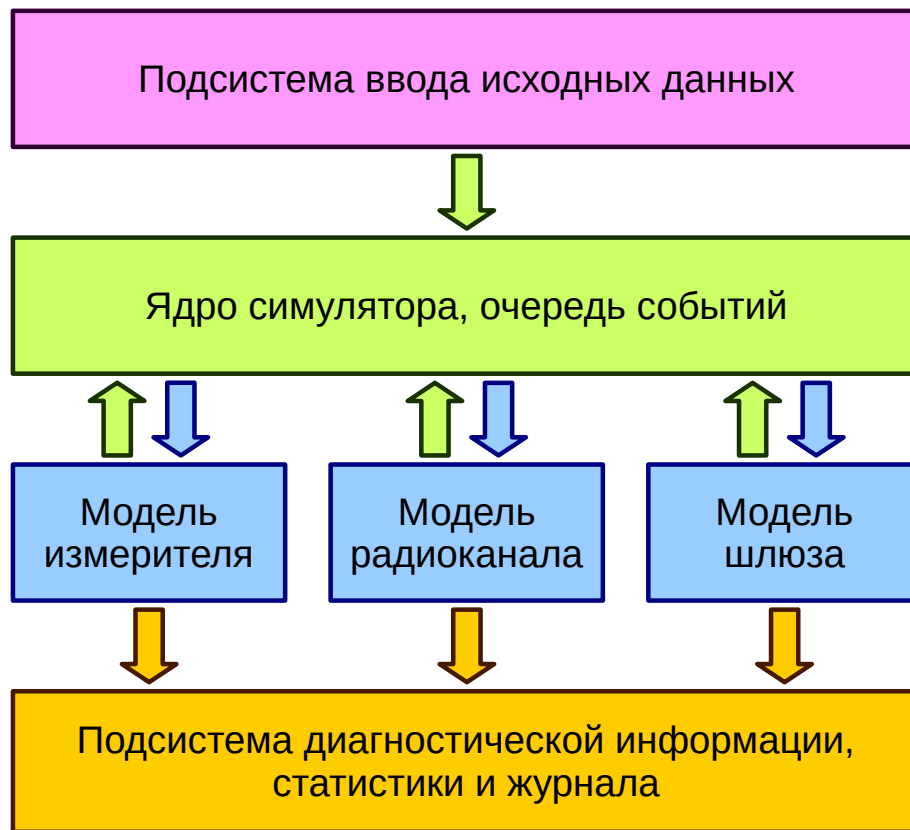


Рис. 4.2. Архитектура симулятора

Подсистема ввода исходных данных проверяет заданные исследователем исходные данные на корректность, создаёт необходимые для симуляции объекты, подключает к ним вспомогательные модели, назначает атрибутам объектов заданные значения. Ядро симулятора обеспечивает процесс моделирования, обслуживает очередь событий, предоставляет моделям доступ к служебной информации и т. д. Модель измерителя определяет его действия при наступлении различных событий (получение сообщения по радио, истечение установленного интервала времени). Модель шлюза, в дополнение к действиям, выполняемым моделью измерителя, управляет построением пространственно-временной структуры взаимодействия узлов. Модель радиоканала, передавая сообщения, обеспечивает взаимодействие моделей измерителей и шлюза. При передаче сообщений модель радиоканала учитывает влияние помех и препятствий. Во время своей работы модели узлов и радиоканала генерируют данные о своём состоянии и происходящих событиях. Эти данные при помощи подсистемы

диагностической информации, статистики и журнала сохраняются для последующего анализа.

Симулятор не имеет графического пользовательского интерфейса. Исследователь формулирует задание на симуляцию через задание аргументов в командной строке, а результаты моделирования сохраняются для последующего анализа в виде файлов на жёстком диске. Причины отказа от графического пользовательского интерфейса при создании симулятора следующие.

1. Имитационное моделирование БСС занимает много времени, иногда несколько суток. Исследователь не в состоянии всё это время находиться за компьютером, контролировать моделирование. Следовательно, в отображении результатов моделирования по мере их появления нет необходимости.
2. Современные многоядерные процессоры обеспечивают возможность исполнения нескольких процессов одновременно, повышая эффективность использования компьютера и экономя время исследователя. Чтобы эти процессы выполнялись без задержек, вызванных ожиданием реакции исследователя, взаимодействие таких процессов с пользователем должно быть исключено. Следовательно, должен быть исключён и графический интерфейс.
3. Задание исходных данных в командной строке упрощает автоматизацию работы исследователя, позволяя ему создавать файлы сценариев, содержащих множественные выполняемые последовательно команды запуска симулятора. После команд моделирования в файле сценария может содержаться команда операционной системы, оповещающая исследователя о завершении моделирования, например, отправкой сообщения по электронной почте, возможно, с вложением в сообщение файла результатов.

4.4. Компоненты и подсистемы симулятора

В этом разделе представлены особенности реализации компонент и подсистем симулятора БСС для космических систем на платформе ns3.

4.4.1. Подсистема ввода исходных данных

За ввод исходных данных и их трансляцию в параметры работы симулятора отвечает подсистема ввода исходных данных. Исходные данные передаются в программу симулятора через задание аргументов в командной строке. Для разбора аргументов используется класс `CommandLine` платформы ns3. Основные аргументы, их назначение и тип данных указаны в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Основные аргументы командной строки симулятора БСС для космических систем

Аргумент	Назначение	Тип данных	Стандартное значение
--Silent	Подавление вывода (1) или вывод (0) информации о событиях БСС	uint32_t	1
--Animation	Создание анимированного файла формата GIF, иллюстрирующего первый период работы сети	uint32_t	0
--Trace	Трассировка событий трансивера узла, номер которого задан аргументом	uint32_t	-1
--Diag	Вывод диагностической информации	uint32_t	0
--seed	Инициализация генератора псевдослучайных чисел	uint32_t	1
--Random	Случайное (1) или или не случайное (0) размещение узлов	uint32_t	1

Аргумент	Назначение	Тип данных	Стандартное значение
--nNodes	Для случая --Random=1: количество узлов сети, равномерно распределяемых в прямоугольной области	uint32_t	100
--sizeX	Для случая --Random=1: ширина прямоугольной области размещения узлов, м	double	750.0
--sizeY	Для случая --Random=1: высота прямоугольной области размещения узлов, м	double	250.0
--file	Для случая --Random=0: имя файла, содержащего координаты размещаемых узлов	std::string	nodes.xyz
--nCycles	Количество периодов работы сети	uint32_t	1
--nCases	Для случая --Random=1: количество случайных размещений узлов	uint32_t	1
--maxDelay	Верхний предел интервала СЗР, мкс (параметр ϕ_3)	uint32_t	0
--MR	Количество попыток повторной отправки сообщений (параметр ϕ_4)	uint32_t	1
--BufDelay	Интервал буферизации, мкс (параметр ϕ_5)	uint32_t	5000
--AFR	Начальная продолжительность АФР, мкс (параметр ϕ_9)	uint32_t	150000

Аргумент	Назначение	Тип данных	Стандартное значение
--shiftAFR	Смещение АФР родителя относительно потомка, мкс (параметр ϕ_{11})	uint32_t	40000
--expAFR	Квант продления АФР, мкс (параметр ϕ_{10})	uint32_t	20000
--altInt	Интервал ожидания альтернативных предложений, мкс (параметр ϕ_1)	uint32_t	20000
--protectInt	Защитный интервал АФС и АФР, мкс (параметр ϕ_7)	uint32_t	500
--recentOrder	Показатель степени 2 количества хранимых на узле пар последних успешно обработанных сообщений (параметр ϕ_2)	uint32_t	3

Например, командная строка

```
$ time waf --run "Sim --nNodes=50 --sizeX=250 --sizeY=250
--Silent=0 --seed=11 --nCycles=30 --nCases=30
--maxDelay=50000 --Animation=0 --MR=1 --BufDelay=8000
--altInt=5000 --protectInt=500 --Trace=0 --AFR=110000
--shiftAFR=60000 --expAFR=15000 --recentOrder=2" >res
```

запускает в среде ns3 (waf) симулятор (Sim),

- моделирующий работу БСС из 50 узлов;
- случайным образом размещённых на площади 250x250 м;
- без вывода журнала;
- генератор псевдослучайных чисел инициализируется числом 11;
- 30 размещений узлов по 30 периодов работы в каждом;

- верхний предел СЗР составляет 50000 мкс;
- без анимации;
- одна дополнительная попытка при неуспешной передаче сообщения;
- интервал буферизации составляет 8000 мкс;
- интервал ожидания альтернативных предложений составляет 5000 мкс;
- защитный интервал АФС и АФР составляет 500 мкс;
- без трассировки событий трансивера;
- длительность АФР составляет 110000 мкс;
- смещение АФР родителя относительно потомка составляет 60000 мкс;
- квант продления АФР составляет 15000 мкс;
- запоминается 4 последних успешно обработанных сообщения;
- стандартный вывод программы записывается в файл `res`;
- по окончании моделирования в окно терминала выводится информация о затраченном времени (`time`).

4.4.2. Ядро симулятора и очередь событий

Согласно алгоритму, представленному на рис. 4.1, перед началом основного цикла симулятора для каждого из узлов создаётся событие включения. Создание этих событий — единственное вмешательство извне в работу узлов. После этого работа симулятора начинается вызовом `Simulator::Run()`.

Далее узлы начинают работать в соответствии со своими автономными моделями. Взаимодействие между моделями осуществляется только посредством обмена событиями через очередь событий. Событие *event* представляет собой совокупность следующей информации:

$$event = (object, time, type, options), \quad (4.1)$$

где *object* — объект, который должен быть оповещён о наступлении этого события, *time* — время наступления события, *type* — тип события, *options* — дополнительно идентифицирующие событие параметры, набор которых зависит от типа события. Класс объекта *object* должен наследовать некоторый

согласованный с ядром интерфейс (абстрактный класс), предоставляющий механизм оповещения объекта о событиях.

В основном цикле ядро симулятора обеспечивает выполнение следующих действий.

1. Выбор первого события из очереди событий.
2. Продвижение времени моделируемой системы к моменту *time* наступления выбранного события.
3. Оповещение объекта *object* — адресата события. Оповещение представляет собой вызов метода, определённого интерфейсом и реализованного в объекте. При вызове методу передаются тип события и дополнительные параметры. Выполнение метода может привести к изменению состояния объекта и к порождению новых событий.
4. Удаление первого события из очереди событий.

При порождении события немедленно заносятся в очередь событий в соответствии с временем их наступления. В ns3 для создания событий служат вызовы `Simulator::Schedule()`, `Simulator::ScheduleNow()` и т. д.

Симулятор обрабатывает очередь событий до тех пор, пока она не пуста. Для планового останова по достижении некоторого значения системного времени в ns3 может использоваться вызов `Simulator::Stop()`.

По окончании симуляции управление передаётся оператору программы, следующему за вызовом `Simulator::Run()`. Программа может содержать любое необходимое количество вызовов `Simulator::Run()`. Например, в случае `--Random=1` симулятор вызывается `nCases` раз.

4.4.3. Модели узлов БСС

Модель узла БСС состоит из моделей уровней стека протоколов БСС. Модель физического и канального уровней обеспечивается модулем `LrWrان`. Модель сетевого и прикладного уровней, реализующая представленные в главе 3 положения, создана в рамках симулятора БСС для космических систем.

Модели измерителя и шлюза многое объединяет, поэтому общая функциональность их программной части реализуется классом NodeApp. Классы SensorApp (измеритель) и GatewayApp (шлюз) наследуют класс NodeApp. В классах SensorApp и GatewayApp реализована специфическая функциональность измерителей и шлюза.

4.4.3.1 Класс NodeApp

Модель узла БСС представляет собой программный код, созданный с использованием парадигмы событийно-ориентированного программирования, т. е. состоящий из обработчиков событий. Использование событийно-ориентированного программирования продиктовано не только требованиями со стороны платформы, но и обычной практикой разработки встроенного программного обеспечения, так как программа большую часть времени проводит в ожидании внешних событий.

Табл. 4.2

Основные элементы интерфейса между моделью узла и модулем LrWrap

Метод	Тип	Назначение
McpsDataConfirm	Событие	Оповещает модель узла о статусе отправки сообщения
McpsDataIndication	Событие	Оповещает модель узла о поступлении сообщения
McpsDataRequest	Команда	Иницирует отправку сообщения

Основные элементы двунаправленного интерфейса взаимодействия модели узла с модулем LrWrap представлены в табл. 4.2. О получении сообщения канальный уровень стека протоколов информирует вышележащий уровень модели узла при помощи события McpsDataIndication(). Обработчик NodeDataIndication() этого события выполняет общие действия, а для специфической обработки вызывает виртуальную функцию OnDataIndication(), перегруженную в наследующих классах и выполняющую обработку в соответствии с их моделями.

Если при обработке события возникает необходимость в отправке сообщения, это делается при помощи команды `McpsDataRequest()`. О состоянии отправки канальный уровень информирует отправителя событием `McpsDataConfirm()`.

Одной из задач, поставленных перед симулятором БСС для космических систем, является определение долговечности (3.20). Для этого симулятор должен моделировать расход энергии ИП. Однако модуль `LrWrap` не содержит законченных средств учёта состояния трансивера, необходимых для моделирования дискретного режима. Для решения этой проблемы объект класса `NodeApp` подключается к системе внутренней трассировки `ns3`, оповещающей о смене состояния трансивера. Анализируя предоставленную информацию, модель узла определяет длительность нахождения трансивера в том или ином состоянии. Этих данных достаточно для моделирования расхода трансивером энергии ИП. В симуляторе принята следующая модель потребления узлом энергии:

- узел спит — микропроцессор и трансивер находятся в состоянии сна, $V = V^{\text{sleep}}$, см. (3.12);
- узел слушает канал или принимает сообщение — микропроцессор работает, трансивер в состоянии приёма, $V = V^{\text{RX}}$;
- узел передаёт сообщение — микропроцессор работает, трансивер в состоянии передачи, $V = V^{\text{TX}}$;
- узел ожидает сообщение — микропроцессор спит, трансивер в состоянии приёма, $V = V^{\text{RXsleep}}$.

Для организации дискретного режима работы класс `NodeApp` содержит методы `Sleep()`, `ForceSleep()` для перевода узла в состояние сна с выключенным трансивером и создания события его пробуждения. При пробуждении узла вызывается виртуальная функция `OnWakeup()`, перегруженная в наследующих классах.

4.4.3.2 Класс GatewayApp

Функциональность класса шлюза соответствует модели, представленной в разделах 3.4.6, 3.4.7 и 3.5.

Перегруженная функция OnWakeup() начинает при каждом нечётном по порядку вызове АФС, а при чётном — АФР. На АФС после передачи сетевой информации узел немедленно засыпает. На АФР шлюз ожидает, принимает и обрабатывает результаты измерений.

Обработка OnDataIndication() состоит в разборе принятого буфера результатов. При получении любого сообщения с результатами устанавливается в единицу индикатор приёма b . Передача результатов родителю начинается только после начала АФР родителя. Когда до окончания АФР остаётся заданный параметром ϕ_{10} интервал времени, обнуляется индикатор b . Если к запланированному моменту окончания АФР индикатор b остался нулевым, АФР завершается. Иначе АФР продлевается ещё на ϕ_{10} . По окончании АФР определяется число успешно принятых результатов измерений n^s для текущего периода работы и смещение АФР для следующего периода работы.

4.4.3.3 Класс SensorApp

Функциональность класса измерителя соответствует модели, представленной в разделах 3.4.6 и 3.4.7.

Перегруженная функция OnWakeup() начинает АФС или АФР. Логика выбора активной фазы для измерителя сложнее, чем для шлюза, вследствие возможного неполучения сообщения с сетевой информацией и вызванного этим пропуска АФР. Обработка OnDataIndication() зависит от того, на какой активной фазе находится измеритель.

На АФС узел ожидает получения сообщения с сетевой информацией. Другие сообщения на АФС игнорируются. После приёма сетевой информации,

выполнения действий по синхронизации и ретрансляции обновлённой сетевой информации узел ожидает получения альтернативных предложений, после чего засыпает.

На АФР обработка состоит в разборе принятого буфера результатов и заполнении своего буфера. При необходимости АФР может быть продлена аналогично тому, как это делается в классе GatewayApp.

4.4.4. Модель радиоканала

Основные классы объектов, при помощи которых модуль LrWrap реализует радиоканал, соответствующий подмножеству стандарта IEEE 802.15.4, приведены в табл. 4.3.

Табл. 4.3

Основные классы объектов модели радиоканала

Класс объекта	Назначение
PropagationDelayModel и наследующие классы	Модель задержки распространения радиоволн
PropagationLossModel и наследующие классы	Модель потерь при распространении радиоволн
SpectrumChannel и наследующие классы	Модель канала, передающего спектр частот

Модель радиоканала задаётся в симуляторе выбором одного из нескольких стандартных классов ns3 или пользовательского класса, наследующего стандартный. В качестве модели канала используется объект класса SingleModelSpectrumChannel. Этому объекту назначаются свойства — модели потерь и задержки распространения. Затем к подготовленному объекту радиоканала подключаются все узлы сети.

Стандартные классы ns3 содержат теоретические и статистические модели потерь при распространении, см. раздел 3.3.1. При необходимости реализации в

симуляторе дополнительной модели потерь создаётся пользовательский класс, наследующий `PropagationLossModel`.

Определение величины потерь выполняется модулем `LrWrap` вызовом метода `DoCalcRxPower()`. Определяя величину потерь, метод `DoCalcRxPower()` учитывает фактическое местонахождение передатчика и приёмника. В симуляторе БСС для космических систем это используется в специфических моделях потерь, учитывающих фактическую конфигурацию объекта обслуживания.

Помехи моделируются добавлением в сеть фиктивных узлов, не выполняющих никакой деятельности, кроме излучения в канал сигнала с определённым спектром по заданному расписанию.

4.4.5. Подсистема диагностической информации, статистики и журнала

Подсистема диагностической информации, статистики и журнала предназначена для вывода результатов имитационного моделирования в различных формах. Отсутствие у симулятора БСС для космических систем графического пользовательского интерфейса не означает, что результаты его работы представлены только в текстовом или цифровом виде. Большие массивы данных представляются симулятором в виде исходных данных для пакета `gnuplot` [112], т. е. фактически являются гистограммами, графиками или другими графическими материалами.

Журнал. В журнал выводится информация о происходящих на узлах событиях. Каждому событию предшествует информация о времени и номере узла. В начале файла журнала выведены все исходные данные, заданные для прогона симулятора. Пример фрагмента журнала показан на рис. 4.3.

В журнале отражаются следующие события:

- пробуждение и засыпание узла,
- получение сообщения по радиоканалу,
- обработка сообщений (сетевая информация, результаты измерений),

- продление АФР.

```
33203.095500 Node 00:32 popped off
33203.095500 Node 00:24 Sleep(): sender is not empty
33203.095500 Node 00:24 AFR was expanded by 15000us
33203.095500 Node 00:1b Sleep(): successfull
33203.095500 Node 00:1b popped off
33203.095500 Node 00:13 Sleep(): successfull
33203.095500 Node 00:13 popped off
33203.095500 Node 00:21 Sleep(): successfull
33203.095500 Node 00:21 popped off
33203.095500 Node 00:27 Sleep(): sender is not empty
33203.095500 Node 00:27 AFR was expanded by 15000us
33203.095500 Node 00:2a Sleep(): successfull
33203.095500 Node 00:2a popped off
33203.095500 Node 00:18 Sleep(): successfull
33203.095500 Node 00:18 popped off
33203.095500 Node 00:19 Sleep(): sender is not empty
33203.095500 Node 00:19 AFR was expanded by 15000us
33203.095500 Node 00:1a Sleep(): sender is not empty
33203.095500 Node 00:1a AFR was expanded by 15000us
```

Рис. 4.3. Фрагмент журнала симулятора

Диагностическая информация. Состав диагностической информации определён выражением (3.19). Диагностическая информация выводится в журнал в конце каждого периода работы. Пример диагностической информации показан на рис. 4.4.

Статистическая информация. К статистической информации относятся значения показателя надёжности сети, среднего расхода энергии узлами, характеристики топологии, распределение количества потомков, распределение узлов по глубине и т. д. Эта информация выводится как в текстовом виде, так и в виде исходных данных для пакета gnuplot.

```
>>> Node 00:02 is turned off
>>> Node 00:10 is turned off
>>> Node 00:13 is turned off
>>> Node 00:14 is turned off
>>> Node 00:16 is turned off
>>> Node 00:18 is turned off
>>> Node 00:19 is turned off
>>> Node 00:1a is turned off
>>> Node 00:1b is turned off
>>> Node 00:1e is turned off
>>> Node 00:21 is turned off
>>> Results from 00:11 were left at 00:11
>>> Results from 00:12 were left at 00:12
>>> Results from 00:04, 00:0a, 00:0b, 00:0c, 00:0e, 00:15, 00:17,
00:1c, 00:1f, 00:20, 00:23, 00:28, 00:2c, 00:30 were left at 00:1f
```

Рис. 4.4. Диагностическая информация

4.5. Сравнение показателей работы БСС с двумя активными фазами и БСС с одной активной фазой

С помощью представленного в данной главе симулятора была промоделирована работа БСС, использующей метод функционирования, представленный в [52]. Для этого была создана копия симулятора БСС для космических систем, в которой был изменён исходный код классов GatewayApp и SensorApp. Были него исключены следующие особенности симулятора:

- две активные фазы,
- смещение активной фазы родителя относительно потомка,
- случайная задержка результата,
- буферизация сообщений,
- обновление адреса родителя,
- предотвращение передачи дубликатов результатов измерений.

В результате был создан симулятор, соответствующий методу функционирования [52].

Перед обоими симуляторами была поставлена задача моделирования работы представленной в разделе 1.1.3 дискретной БСС, выполняющей мониторинг

качества тушения торфяного пожара для расширения информации, собираемой системой ДЗЗ. Сеть состоит из 50 узлов, случайно распределённых на площади 250x250 м. Узлы обеих БСС оснащены автономными ИП с располагаемым запасом энергии 10 Дж — низкое значение запаса энергии ИП предназначено для ускорения процесса симуляции. После исчерпания запаса энергии ИП узлы выходят из строя и в дальнейшей работе участия не принимают.

Результаты работы симуляторов представлены на рис. 4.5 и 4.6. Долговечность (при $R^{\min}=0.8$) БСС для космических систем составляет 415 периодов работы. Долговечность дискретной БСС, работающей согласно [52], составляет 200 периодов работы.

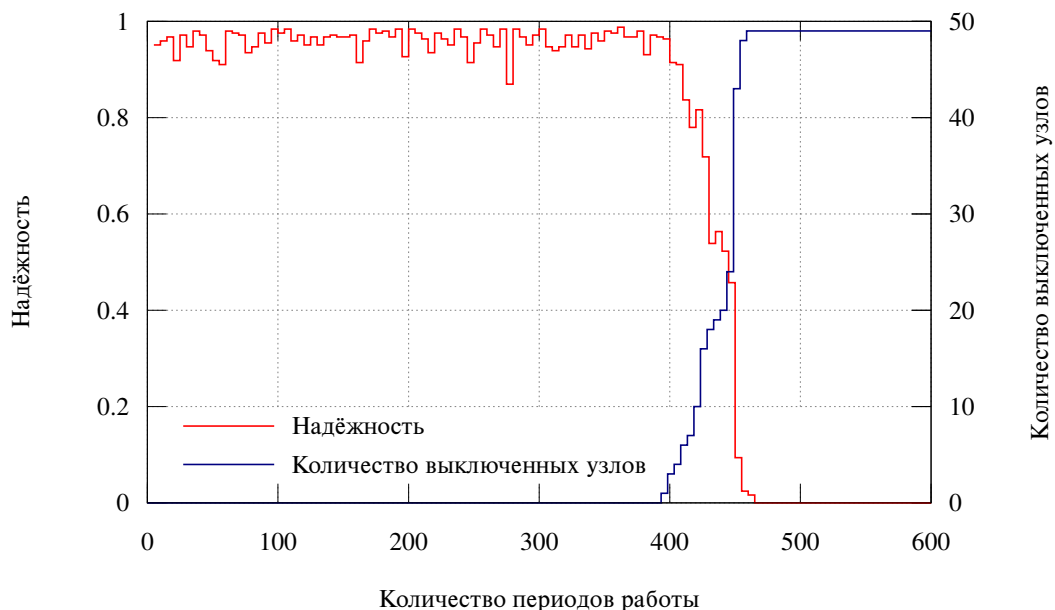
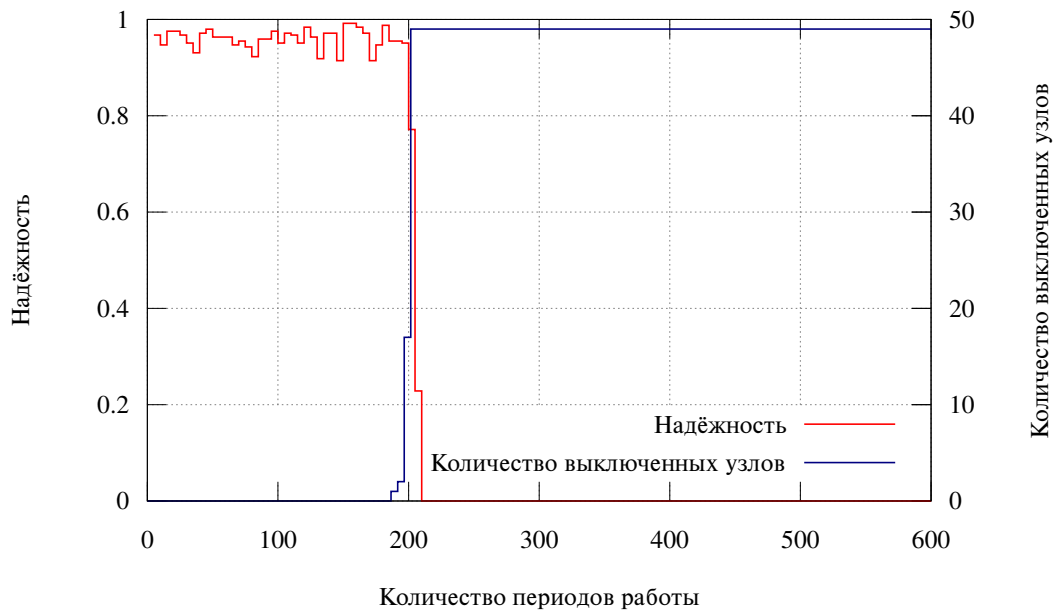
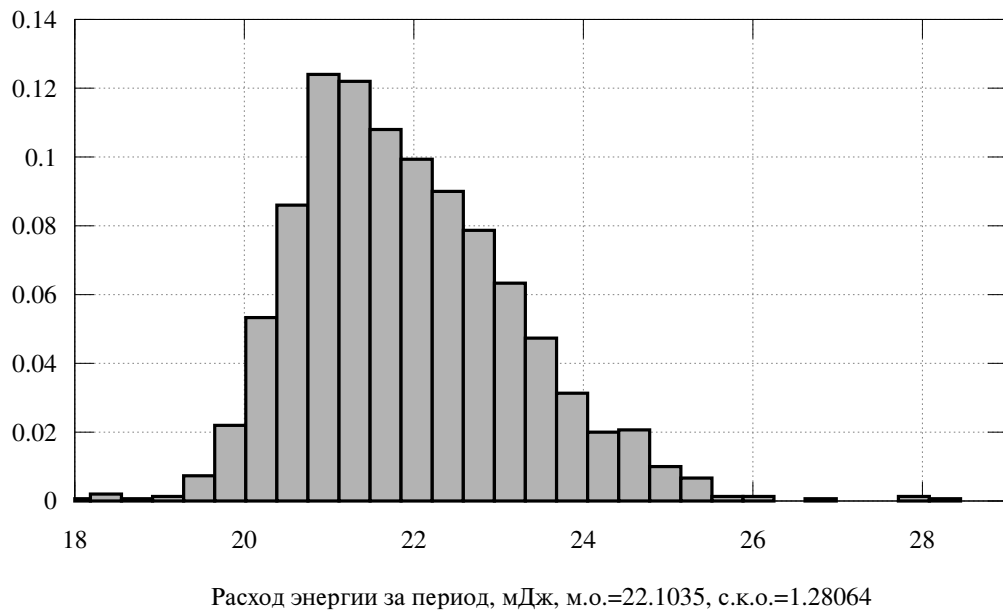


Рис. 4.5. Надёжность и количество выключенных узлов:
БСС для космических систем

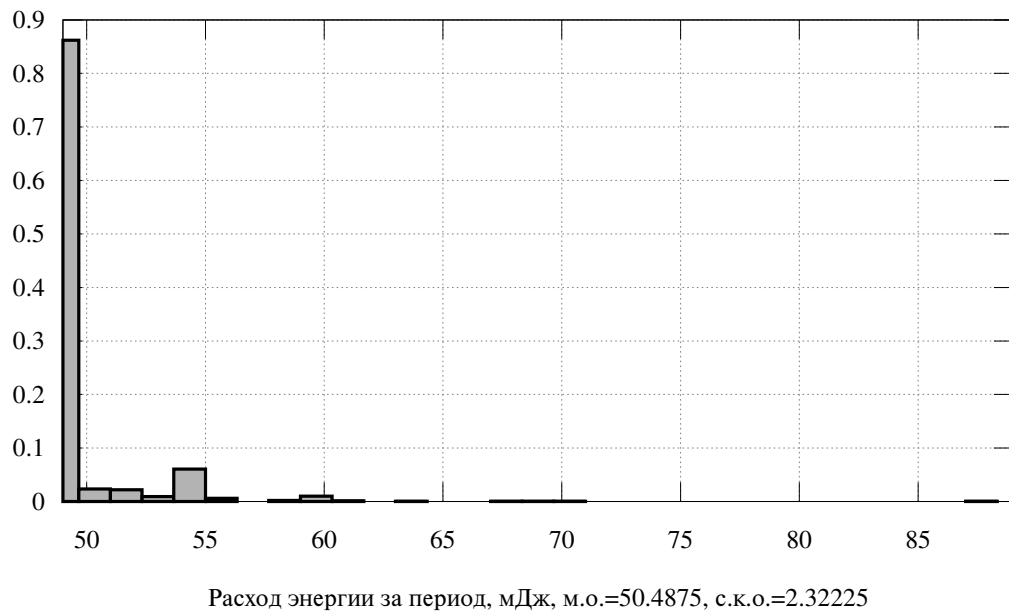


*Рис. 4.6. Надёжность и количество выключенных узлов:
дискретная БСС с одной активной фазой*

Разница в долговечности двух БСС более чем в два раза объясняется значительно большим расходом энергии узлами второй БСС, что видно из гистограмм на рис. 4.7 и 4.8. В свою очередь, более высокий расход энергии узлами второй БСС объясняется тем, что активная фаза её узлов (установленная равной 415000 мкс для обеспечения равной с первой БСС надёжности) более чем в два раза продолжительнее суммарной длительности АФС и АФР первой БСС.



*Рис. 4.7. Распределение расхода энергии за период:
БСС для космических систем*



*Рис. 4.8. Распределение расхода энергии за период:
дискретная БСС с одной активной фазой*

В четвёртой главе работы представлен симулятор БСС для космических систем, функционирующей согласно сформулированным во второй главе принципам и построенной в третьей главе модели. Также представлены результаты имитационного моделирования, показывающие эффективность представленных принципов и модели в сравнении с дискретной БСС с одной активной фазой: при равной надёжности долговечность БСС для космических систем более чем в два раза выше.

Глава 5. Методика проектирования БСС для космических систем

При построении БСС для космических систем, функционирующих согласно методу, основные положения которого изложены во второй главе, а модель — в третьей главе, рациональные значения их структурных и функциональных параметров определяются при помощи представленной в данной главе методики. Эта методика опирается на использование имитационного моделирования, инструмент для выполнения которого представлен в четвёртой главе. Предлагаемая методика проектирования — итерационная, с оценкой качества результатов и, при необходимости, возвратами на предыдущие шаги. Схема методики показана рис. 5.1.

5.1. Подготовка модели объекта обслуживания

Неотъемлемой частью созданной в третьей главе модели является объект обслуживания Ω , в том числе координаты мест, в которых необходимо выполнять измерения или получать информацию для передачи.

Подготовка модели Ω должна начинаться с задания СК. Далее в соответствии с (3.1) должны быть определены множества составных частей, помех и модель потерь при распространении радиоволн, характерная для объекта обслуживания. Необходимое для моделирования количество составных частей определяется количеством независимо перемещающихся значимых элементов обслуживаемого объекта:

$$N^{\text{part}} = k + 1, \quad (5.1)$$

где k — количество независимо перемещающихся значимых элементов объекта обслуживания. Если некоторый обслуживаемый объект не содержит перемещающихся элементов, то такой объект должен моделироваться единственной частью.

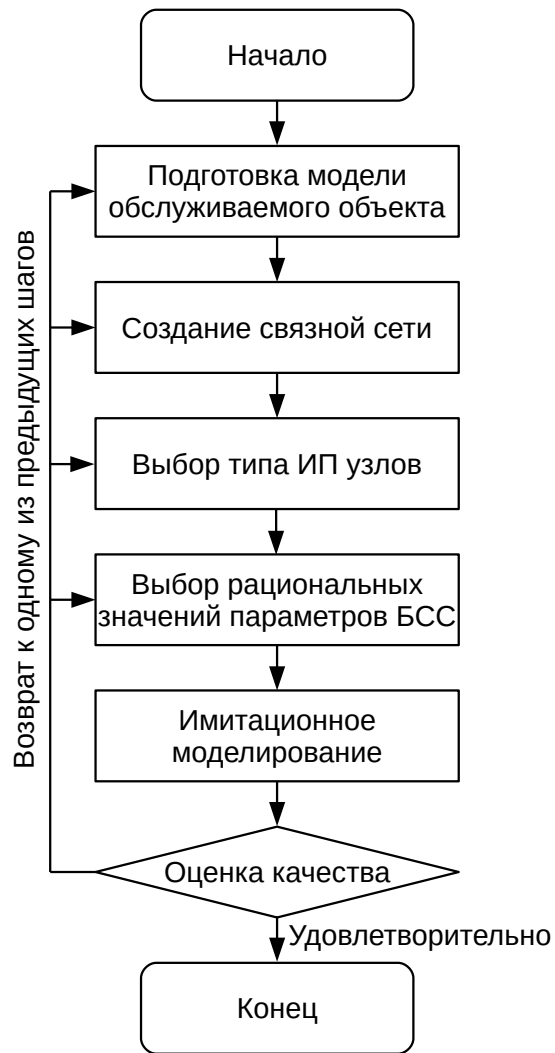


Рис. 5.1. Методика проектирования БСС для космических систем

Составные части. Для каждой из частей объекта обслуживания должны быть выбраны расположение и ориентация СК, заданы входящие в неё геометрические элементы. Для СК части должен быть задан закон изменения её положения $X^G(t)$. В соответствии с (3.3) геометрия части определяется составляющими её телами и значениями признака их материала. Следовательно, для каждой части объекта обслуживания должны быть созданы геометрические модели тел и заданы значения признаков их материала. При этом должны быть учтены два следующих замечания.

Замечание 1. Если материал, из которого изготовлено некоторое тело, слабо препятствует распространению электромагнитных волн (к таким материалам относятся дерево, резина, ткань, пластик, стекло и т. п.), то влиянием данного тела на затухание сигнала можно пренебречь. Такое геометрическое тело может считаться радиопрозрачным. Следовательно, данное тело может быть исключено из рассмотрения, и модель для него создавать не требуется.

Замечание 2. Необходимость создания геометрических моделей нерадиопрозрачных тел зависит от выбранной модели потерь M , см. далее. Если материал некоторого тела препятствует распространению радиоволн (к таким материалам относятся, например, металлы), то, в случае выбора одной из специфических моделей потерь, влиянием данного тела пренебречь нельзя, и для этого тела должна быть создана геометрическая модель.

Помехи. Для каждой из моделируемых в симуляторе помех в соответствии с (3.5) должны быть заданы закон изменения спектральной плотности мощности и закон изменения положения помехи.

Модель потерь при распространении радиоволн. Для объекта обслуживания должна быть выбрана адекватная модель потерь M . Часто используемые модели перечислены в табл. 3.3. Выбор может быть сделан путём экспертной оценки объекта обслуживания или (при возможности) в результате проведённого эксперимента. При отсутствии необходимой компетенции для выбора модели потерь во избежание получения недостоверных результатов следует выбирать одну из специфических моделей. Однако следствием такого выбора является существенное увеличение времени, необходимого для имитационного моделирования работы БСС.

Если для объекта обслуживания выбрана модель потерь, не требующая точного вида объекта (например, одна из статистических моделей), то геометрических моделей тел создавать не требуется.

Выбранная модель потерь должна быть назначена в качестве модели потерь для объекта радиоканала симулятора БСС, см. раздел 4.4.4. Пример создания и назначения объекта класса `MyPropagationLossModel` показан на рис. 5.2.

```

LrWpanHelper lrWpanHelper(false);

/***** модели потерь и задержки *****/
Ptr<MyPropagationLossModel> propModel =
    CreateObject<MyPropagationLossModel> ();

Ptr<ConstantSpeedPropagationDelayModel> delayModel =
    CreateObject<ConstantSpeedPropagationDelayModel> ();

Ptr<SingleModelSpectrumChannel> channel =
    CreateObject<SingleModelSpectrumChannel> ();

channel->AddPropagationLossModel (propModel);
channel->SetPropagationDelayModel (delayModel);

lrWpanHelper.SetChannel(channel);

```

Рис. 5.2. Создание и назначение модели потерь при распространении радиоволн объекту радиоканала в симуляторе БСС

Места выполнения и состав измерений. Места выполнения и состав измерений задаются директивно и не могут быть изменены. Для каждого измерения должны быть зафиксированы тип его значения (целое число, число с плавающей точкой и т. п.) и размер.

Результатом выполнения предусмотренных данным этапом действий является подготовленная модель объекта обслуживания, пригодная для имитационного моделирования БСС.

5.2. Создание связной сети

Размещение узлов БСС начинается с измерителей (источников передаваемой информации). Эти узлы размещаются в соответствии с ранее определёнными местами выполнения измерений. Если несколько мест измерений расположены поблизости, то выполняющие измерения датчики могут быть обслужены одним

узлом. В симуляторе фиксированное положение узлов указывается заданием параметра `--Random=0`, а их координаты указываются в файле, имя которого задаётся параметром `--file`.

Нерадиопрозрачные элементы объекта обслуживания препятствуют распространению радиосигналов, блокируя возможность передачи сообщений между узлами, результатом чего станет низкая надёжность БСС. Поэтому для обеспечения связности сети должна быть проверена возможность передачи результатов измерений от каждого узла. При необходимости должны быть предусмотрены меры, обеспечивающие такую возможность. Существует несколько способов обеспечения связности сети — перемещение узлов, добавление маршрутизаторов, сегментирование сети. Рассмотрим эти способы.

Перемещение узлов. Простейшим способом обеспечения связности сети является перемещение узлов в такие места, в которых радиосвязь с другими узлами возможна. Однако такое перемещение узлов возможно не всегда, так как узлы БСС должны располагаться вблизи от обслуживаемых ими датчиков. При существенном удалении узлов от датчиков увеличение длины соединяющих их проводов может обесценить преимущества, обеспечиваемые применением беспроводной связи.

Добавление маршрутизаторов. Другим способом обеспечения связности сети является добавление в состав БСС дополнительных узлов, которые, не выполняя собственных измерений, будут ретранслировать сообщения других узлов.

Особо рассмотрим случай, когда часть узлов сети расположена в некотором замкнутом, изолированном от внешнего пространства объёме, например, в металлическом топливном баке. Маршрутизатор, установленный в том же баке, не обеспечит возможности передачи сообщений находящимся снаружи металлического бака узлам. В этом случае связность беспроводной сети может быть обеспечена при помощи маршрутизатора с двумя антеннами, одна из которых расположена внутри бака, а другая — снаружи. Приняв сообщение на

внутреннюю антенну, такой маршрутизатор может ретранслировать его наружу при помощи внешней антенны.

Таким образом, проблема связности БСС обнаруживается при моделировании и решается путём перемещения узлов или добавлением маршрутизаторов.

Сегментирование БСС. В некоторых случаях нецелесообразно объединять все узлы БСС в единую сеть. Созданию единой беспроводной сети объекта обслуживания могут препятствовать:

- большой объём подлежащих передаче по сети данных,
- сложности в организации связной сети, вызванные конструкцией объекта обслуживания и/или мощными источниками помех.

В таких случаях БСС должна создаваться в виде набора изолированных друг от друга беспроводных сегментов. Каждый из этих сегментов должен иметь собственный шлюз, собирающий результаты измерений и передающий их в центр управления посредством проводных линий связи. Сочетание беспроводных сегментов с проводными линиями связи делает сеть гетерогенной [113]. При принятии решения о сегментировании БСС рассматриваемая методика проектирования должна применяться к каждому из сегментов сети в отдельности.

Успех каждого из рассмотренных способов обеспечения связности должен быть подтверждён проведением вычислительного или натурального эксперимента.

Результатом данного этапа проектирования БСС является обеспечение связности БСС.

5.3. Выбор типа источников питания узлов

Для каждого из узлов должен быть выбран тип ИП: сетевой или автономный. Кроме того, для автономных ИП должна быть рассмотрена возможность пополнения запаса его энергии.

Сетевой ИП. При наличии возможности следует использовать сетевое питание для узлов БСС. Если в КС отсутствует необходимость экономии энергии,

то сетевое питание позволяет узлам использовать электрическую энергию без ограничений, не переходя в режим сна. Долговечность узлов, получающих энергию от электрической (возможно, бортовой) сети ограничивается лишь сроком службы самих узлов. Ресурс ИП таких узлов не может быть исчерпан, поэтому действий по замене их ИП при обслуживании БСС предпринимать не требуется.

Однако применение сетевых ИП ограничивает предоставляемые БСС преимущества — узлы могут размещаться только в специальном образом подготовленных местах. Установке узлов должно предшествовать подведение кабелей питания. В результате стоимость установки БСС возрастает, а её масса увеличивается за счёт проводов, разъёмов и т. д.

Поэтому использование сетевых ИП может быть рекомендовано для следующих узлов:

- обслуживающих датчики, выполняющие измерения в местах наличия сетевого питания,
- обслуживающих датчики, потребляющие при работе много энергии,
- по каким-либо причинам требующих проводных коммуникаций, например, для шлюза, подключённого проводами к центру управления.

Автономный невозобновляемый ИП. Обычно в качестве таких ИП используются гальванические элементы. Для повышения долговечности узлов, оснащённых автономными невозобновляемыми ИП применяется дискретный режим работы. Применение более сложного алгоритма работы позволяет устанавливать такие узлы в любых местах объекта обслуживания, обеспечивая при этом снижение расхода энергии. Необходимая периодичность замены исчерпанных ИП определяется при помощи имитационного моделирования.

Автономный ИП, пополняемый за счёт энергии окружающей среды. При таком типе электропитания энергия окружающей среды преобразуется в электрическую и сохраняется в накопителе, см. рис. 5.3.

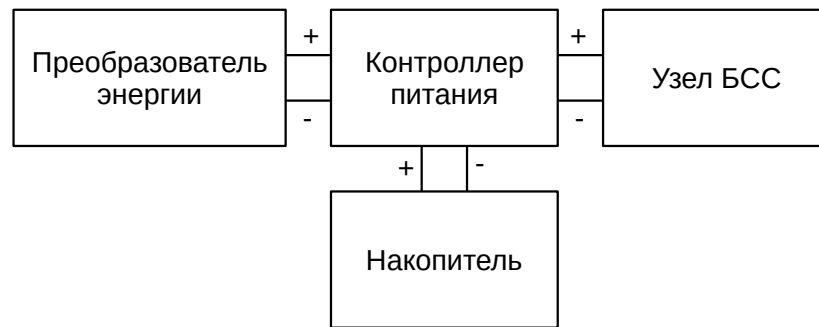


Рис. 5.3. Узел БСС с накопителем, в котором сохраняется извлечённая из окружающей среды энергия

Окружающая узел БСС среда, которой обычно является объект обслуживания, может обладать энергией различных неэлектрических видов: тепловой (пример источника — разность температур между нагретыми компонентами газотурбинного двигателя самолёта и набегающим потоком воздуха [114]), световой (пример источника — солнечный свет [115]), механической (пример источника — ветер [116]) и т. д. Преобразователь извлекает из окружающей среды энергию определённого вида и преобразует её в электрическую энергию, которая используется для питания компонентов узла или для сохранения в накопителе. В роли накопителя могут выступать конденсатор, ионистор (суперконденсатор) или аккумулятор. Процессом накопления и расходования энергии управляет контроллер питания.

Если поступление энергии из окружающей среды постоянно и её количество достаточно для непрерывной работы компонентов узла БСС, узел может работать в непрерывном режиме. В противном случае такой узел должен работать в дискретном режиме.

Результатом этого этапа проектирования является обоснованный выбор типа ИП для каждого из узлов БСС.

5.4. Определение значений управляющих параметров БСС для космических систем

В соответствии с (3.13) работой БСС управляют перечисленные в табл. 3.2 параметры ϕ , определяемые на этапе проектирования. Ниже приведена методика определения значений этих параметров. Для некоторых параметров предусмотрено определение их значений по результатам имитационного моделирования, поэтому предварительно должен быть выбран начальный диапазон для проведения исследования. Входящая в (3.13) величина φ смещения АФР шлюза определяется шлюзом динамически согласно модели, изложенной в разделе 3.5.

5.4.1. Максимальный интервал ожидания альтернативных предложений

Изложенное в разделе 2.3 положение метода функционирования БСС для космических систем предусматривает возможность обновления адреса родителя при поступлении альтернативных предложений. Обновление адреса родителя происходит при одновременном выполнении следующих условий: 1) альтернативное предложение поступило во время интервала ожидания альтернативных предложений, 2) альтернативное предложение не уступает по глубине принятому, 3) качество связи со шлюзом в альтернативном предложении выше, чем в принятом. Максимальный интервал ожидания альтернативных предложений определяется параметром ϕ_1 , см. табл. 3.2. Фактическая длительность ожидания определяется в зависимости от текущего качества связи узла со шлюзом, см. выражение (3.116).

На определение рационального значения ϕ_1 влияют следующие факторы.

1. Увеличение ϕ_1 повышает вероятность улучшения качества связи. Величина ϕ_1 должна быть достаточной, чтобы конкурирующие за канал узлы могли успеть ретранслировать сетевую информацию. Это означает, что величина

ϕ_1 должна быть не ниже средней величины задержки доступа к каналу w . Моделирование показывает, что средняя величина задержки доступа к каналу возрастает при увеличении предложенной нагрузки на сеть. Поэтому при выборе значения ϕ_1 следует учитывать ожидаемое значение предложенной нагрузки.

2. Уменьшение ϕ_1 сокращает продолжительность АФС, т. е. снижает расход энергии.
3. Сетевая информация распространяется по сети достаточно быстро, так как не требует подтверждения получения. Следовательно, чрезмерное увеличение ϕ_1 не приводит к повышению надёжности, но повышает расход энергии.

Рациональное значение ϕ_1 может определено с помощью имитационного моделирования работы БСС. На рис. 5.4 приведена зависимость надёжности БСС и среднего расхода энергии её узлами за один период работы от величины интервала ожидания альтернативных предложений при следующих условиях: 50 узлов равномерно распределены на площади 250x250 м, $T=200$ с, $\phi_2=3$, $\phi_3=50$ мс, $\phi_4=1$, $\phi_5=10$ мс, $\phi_6=0$, $\phi_7=0.5$ мс, $\phi_8=2$ с, $\phi_9=110$ мс, $\phi_{10}=10$ мс, $\phi_{11}=50$ мс, 30 реализаций по 30 периодов работы в каждой. Доверительные интервалы построены для надёжности 0.95. Рациональным выбором в этом случае будет значение $\phi_1=2$ мс.

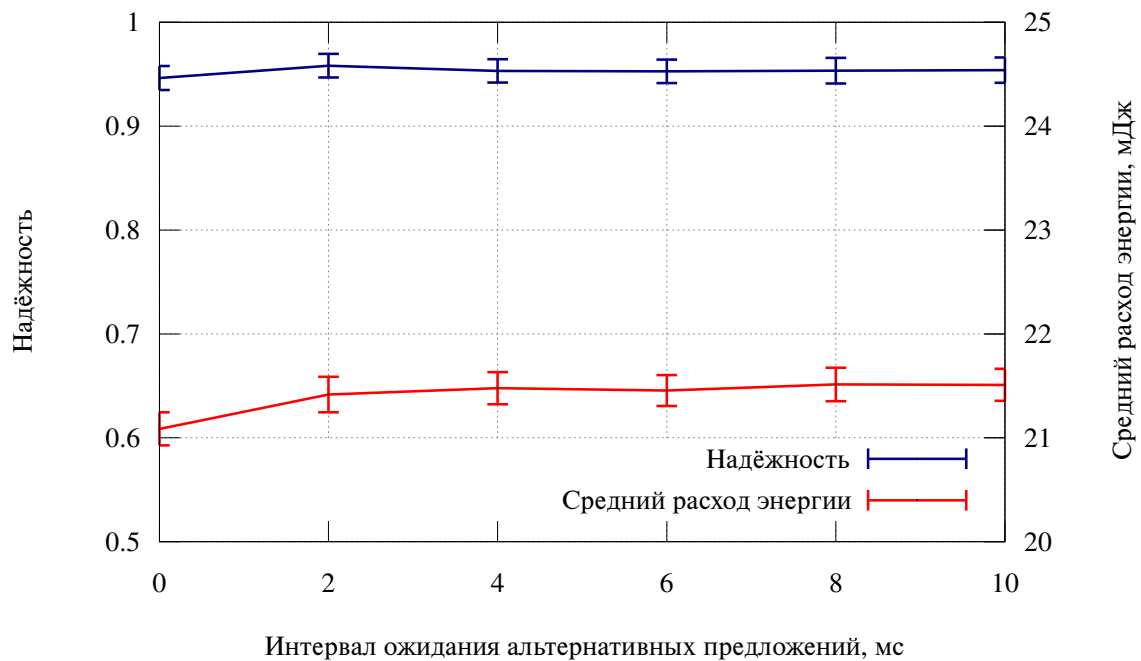


Рис. 5.4. Зависимость между показателями работы БСС и величиной интервала ожидания альтернативных предложений

5.4.2. Количество хранимых на узле пар последних успешно обработанных сообщений

В соответствии с положением, изложенным в разделе 2.8, при сборе результатов измерений на АФР должна предотвращаться передача сообщений-дубликатов. Для этого в оперативной памяти узла создаётся список *Recent*, хранящий информацию о последних успешно обработанных сообщениях, см. раздел 3.4.7.2. Для каждого сообщения хранятся адрес отправителя A и порядковый номер $SeqNo$. При поступлении очередного сообщения с помощью (3.121) проверяется, существует ли в списке *Recent* пара, значения которой соответствуют поступившему сообщению. Если пара существует, то это означает, что данное сообщение уже было обработано, поэтому оно считается дубликатом и игнорируется. Предельное число m пар $(A, SeqNo)$ определяется параметром ϕ_2 , см. (3.120).

При определении значения параметра ϕ_2 учитываются два фактора, влияние которых на величину ϕ_2 противоположно. Первый: чем больше значение ϕ_2 , тем лучше решается задача предотвращения передачи дубликатов, и поэтому величина ϕ_2 должна быть большой. Второй: оперативная память микропроцессоров узлов БСС имеет ограниченный размер, и поэтому величина ϕ_2 должна быть малой.

Дубликаты сообщений появляются тогда, когда подтверждающее успешный приём сообщение АСК не было доставлено отправителю, что случается, если происходит коллизия. Такая ситуация может иметь место при высокой предложенной нагрузке на канал. Однако высокое значение предложенной нагрузки само по себе не является причиной для увеличения значения параметра ϕ_2 , так как на АФР узел принимает сообщения только от потомков в топологии и, если потомков немного, то дубликаты будут выявлены. Таким образом, если количество потомков узла не превосходит размера буфера, то появившиеся дубликаты будут выявлены и повторная их передача будет предотвращена.

Размер буфера *Recent* определяется при проектировании БСС, так как в программах узлов вследствие ограниченности ресурсов не используется динамическое распределение памяти. Так как БСС обслуживает нестационарный объект, то, без знания топологии сети минимально достаточные значения параметра ϕ_2 определить для каждого из узлов нельзя. Для БСС, обслуживающей нестационарный объект, определяется единое для всех узлов значение ϕ_2 .

Задача определения значения ϕ_2 формулируется следующим образом. Для заданного значения относительной предложенной нагрузки q и плотности распределения количества потомков $p(n)$, $n=0,1,\dots$ узла определить такой размер буфера *Recent*, который обеспечит значение вероятности p^{double} возникновения дубликата, не превосходящей максимально допустимой вероятности $p_{\text{max}}^{\text{double}}$:

$$(q, p(n), p_{\text{max}}^{\text{double}}) \rightarrow \phi_2. \quad (5.2)$$

К возникновению дубликатов приводит неуспешная доставка АСК после успешной доставки результата измерения. Вероятность $p_{\text{возник}}^{\text{double}}$ такой последовательности событий связана с вероятностью p успешной доставки сообщения:

$$p_{\text{возник}}^{\text{double}} = p(1-p) = p - p^2. \quad (5.3)$$

В свою очередь, вероятность успешной доставки сообщения зависит от величины предложенной нагрузки q .

Учитывая, что передаче узлом сообщения с результатами своему родителю предшествует период ожидания результатов (см. раздел 2.9), будем считать, что каждый из потомков после получения АСК в ответ на своё сообщение выбывает из конкуренции.

Вероятность $p_{\text{выявлен}}^{\text{double}}$ того, что при размере ϕ_2 списка успешно полученных сообщений появившийся дубликат будет выявлен, определяется выражением

$$p_{\text{выявлен}}^{\text{double}} = \sum_{n=0}^{\phi_2} p(n). \quad (5.4)$$

Вероятность того, что дубликат появится и не будет выявлен, не должна превышать $p_{\text{max}}^{\text{double}}$:

$$(p - p^2) \left(1 - \sum_{n=0}^{\phi_2} p(n) \right) \leq p_{\text{max}}^{\text{double}}. \quad (5.5)$$

После преобразований получаем

$$\sum_{n=0}^{\phi_2} p(n) \geq 1 - \frac{p_{\text{max}}^{\text{double}}}{p - p^2}. \quad (5.6)$$

Таким образом, для определения ϕ_2 , удовлетворяющего предъявленным требованиям, необходимо исходя из значения q определить p и вычислить правую часть (5.6). Затем требуется определить минимальное значение ϕ_2 , при котором выполняется (5.6). Если найденное таким образом значение ϕ_2 не удовлетворяет ограничению на размер памяти данных, то значение ϕ_2 должно быть сокращено до максимально возможного. Однако это означает, что

вероятность возникновения дубликатов сообщений превысит максимально допустимое значение p_{\max}^{double} .

Плотность распределения количества потомков $p(n)$ зависит, в том числе, от приходящейся на один узел площади (в пространственном случае — объёма). Она может быть определена в результате имитационного моделирования. Например, для плоскостной БСС, в которой на один размещённый случайным образом узел приходится 1000, 2500 и 5000 кв. м, плотность вероятности на рис. 5.5.

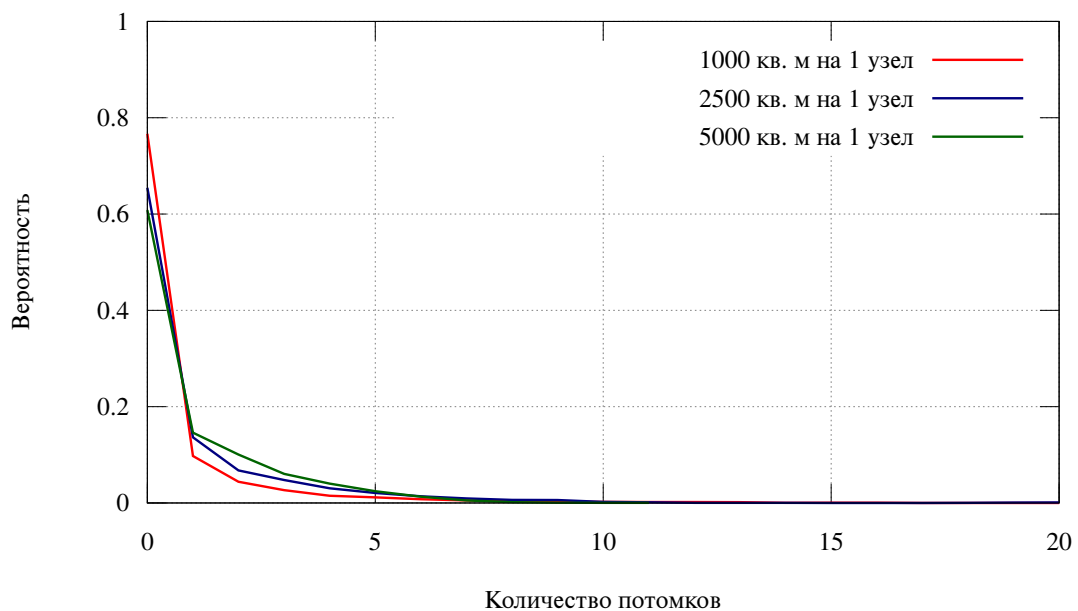


Рис. 5.5. Плотность вероятности количества потомков в БСС, полученная в результате имитационного моделирования

5.4.3. Параметры комбинации СЗР и настойчивости

В соответствии с положением, изложенным в разделе 2.9, на АФР при передаче первого результата измерения узла используется случайная задержка. Если в ответ на отправку сообщения с результатами измерений не поступило подтверждение его получения, то предпринимается определённое количество попыток повторной отправки такого сообщения. В связи с этим рассматривается

задача определения верхней границы интервала СЗР, см. (3.125), и количества попыток повторной отправки — параметров ϕ_3 и ϕ_4 .

На определение значения ϕ_3 противоположным образом влияют задача снизить конкуренцию за канал среди потомков общего родителя, требующая увеличения ϕ_3 , а также задача не допустить избыточного расхода энергии вследствие простоя узлов в активном состоянии при высоком значении ϕ_3 .

Параметры комбинации СЗР и настойчивости могут быть определены двумя способами — статически и динамически.

Статическое определение значений параметров происходит во время проектирования БСС. Статический способ может предполагать как использование единых значений для всех узлов сети, так и назначение индивидуальных значений. Назначение индивидуальных значений параметров допустимо только при разработке БСС объектов, конфигурация которых не изменяется, поэтому далее не рассматривается. Выбор значений параметров должен быть основан на результатах имитационного моделирования. Преимуществом статического способа является его простота. Недостатком статического определения единого сочетания значений ϕ_3 и ϕ_4 для всех узлов является отсутствие возможности учёта изменений в значении предложенной нагрузки при изменении конфигурации обслуживаемого объекта. Вследствие этого в областях с фактической нагрузкой, меньшей расчётной, узлы будут простаивать, а в областях с фактической нагрузкой, большей расчётной, высокий уровень конкуренции приведёт к снижению надёжности.

Динамическое определение параметров СЗР и настойчивости должно выполняться на узлах сети во время её работы. При этом узлы должны измерять уровень предложенной нагрузки в местах своего расположения. Это может быть сделано при помощи сигнала ССА трансивера, который показывает, может ли трансивер начать передачу. Если уровень сигнала в канале выше установленного порогового значения, трансивер сообщает, что канал занят. Заметим, что величина

нагрузки определяется узлом на одном цикле работы сети, а используется на следующем цикле работы.

Методика определения параметров комбинации СЗР и настойчивости следующая. При различных уровнях предложенной нагрузки выполняется имитационное моделирование работы сети с различными сочетаниями ϕ_3 и ϕ_4 . Для каждого из уровней предложенной нагрузки в системе координат «долговечность — надёжность» строятся точки, соответствующие результатам имитационного моделирования, см. рис. 5.6. Неэффективные по Парето решения исключаются. Исходя из требований надёжности и долговечности БСС для каждого уровня надёжности выбирается единственное сочетание (ϕ_3, ϕ_4) . Такие выбранные сочетания заносятся в таблицу, записываемую в память узлов. Во время работы в зависимости от измеренного значения предложенной нагрузки используются параметры соответствующей ей пары (ϕ_3, ϕ_4) .

Например, пусть БСС, результаты моделирования которой показаны на рис. 5.6, должна обеспечивать надёжность не менее 0,8. Тогда должно быть выбрано сочетание $(\phi_3=0.8, \phi_4=0)$ как обеспечивающее максимальную долговечность при требуемой надёжности.

Таким образом, на данном этапе проектирования должно быть определено, как — статически или динамически — будут определяться параметры СЗР и настойчивости. Если выбран статический способ, то требуется определить постоянное для всех узлов сочетание (ϕ_3, ϕ_4) . Если выбран динамический способ, то должна быть сформирована и занесена в память узлов таблица оптимальных для различных уровней нагрузки сочетаний параметров.

5.4.4. Интервал буферизации

В методе функционирования БСС для космических систем применяется буферизация, приводящая к накоплению принятых результатов в буфере с последующей отправкой буфера, см. раздел 2.10. Управляющим параметром,

предотвращающим долгое нахождение принятых результатов измерений в буфере, является величина интервала буферизации ϕ_5 .

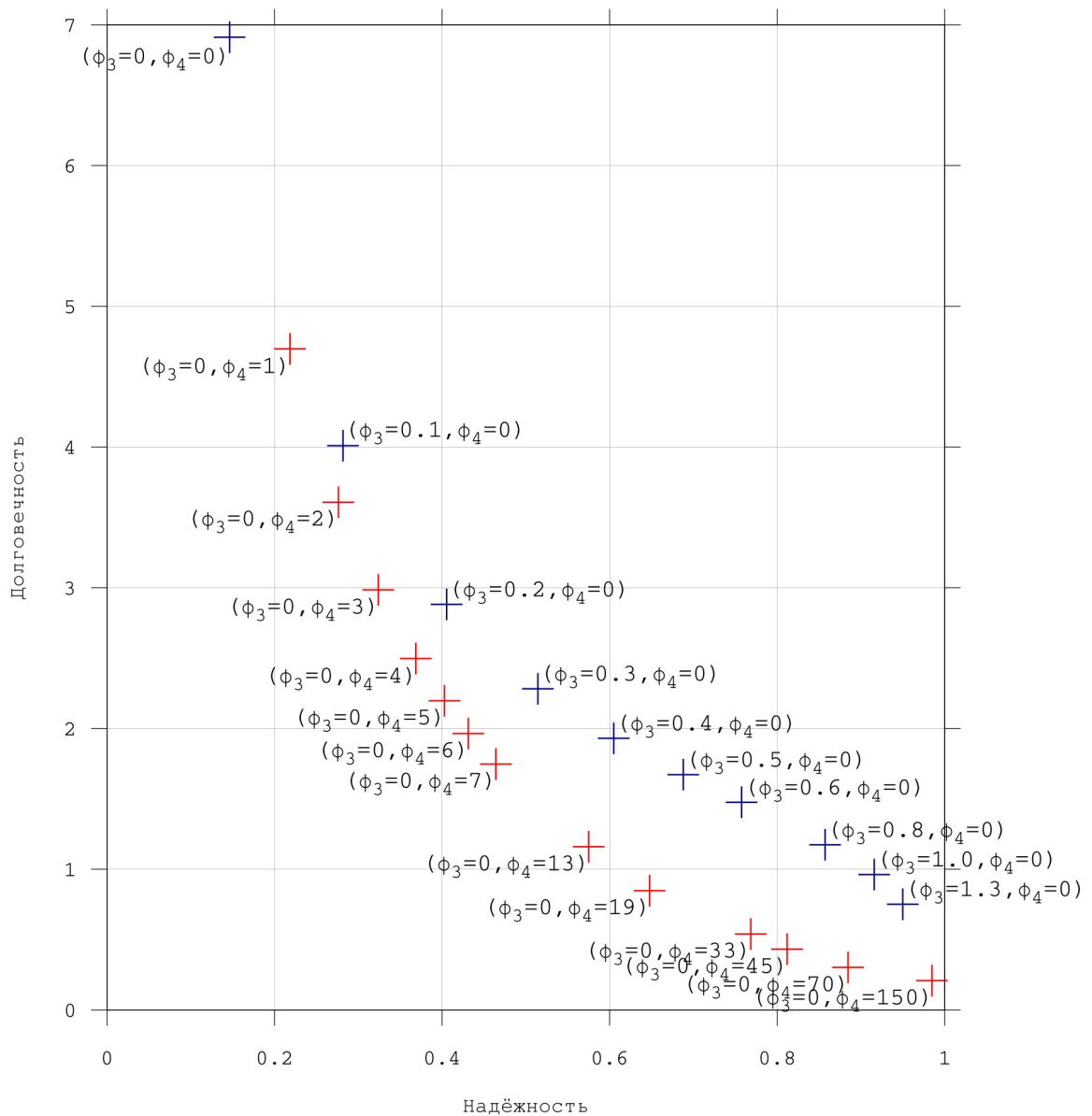


Рис. 5.6. Значения надёжности и долговечности для различных случаев комбинации СЗР и настойчивости

Значение данной величины выбирается в результате компромисса между двумя тенденциями. Первая тенденция предусматривает скорейшую передачу результатов измерений для сокращения длительности АФР, а, следовательно, снижения расхода энергии. Эта тенденция требует снижения величины интервала

буферизации. Вторая тенденция предусматривает накопление в буфере возможно большего количества результатов измерений, чтобы снизить нагрузку на канал, тем самым повысив надёжность. Эта тенденция требует увеличения величины интервала буферизации. Зависимость надёжности и среднего расхода энергии узлами БСС от интервала буферизации показана на рис. 5.7. Эта зависимость определена имитационным моделированием при следующих условиях: 50 узлов равномерно распределены на площади 250x250 м, $T=200$ с, $\phi_1=5$ мс, $\phi_2=3$, $\phi_3=50$ мс, $\phi_4=1$, $\phi_6=0$, $\phi_7=0.5$ мс, $\phi_8=2$ с, $\phi_9=110$ мс, $\phi_{10}=10$ мс, $\phi_{11}=50$ мс, 30 реализаций по 30 периодов работы в каждой. Доверительные интервалы построены для надёжности 0.95. Рациональным выбором в этом случае будет значение $\phi_5=50$ мс.

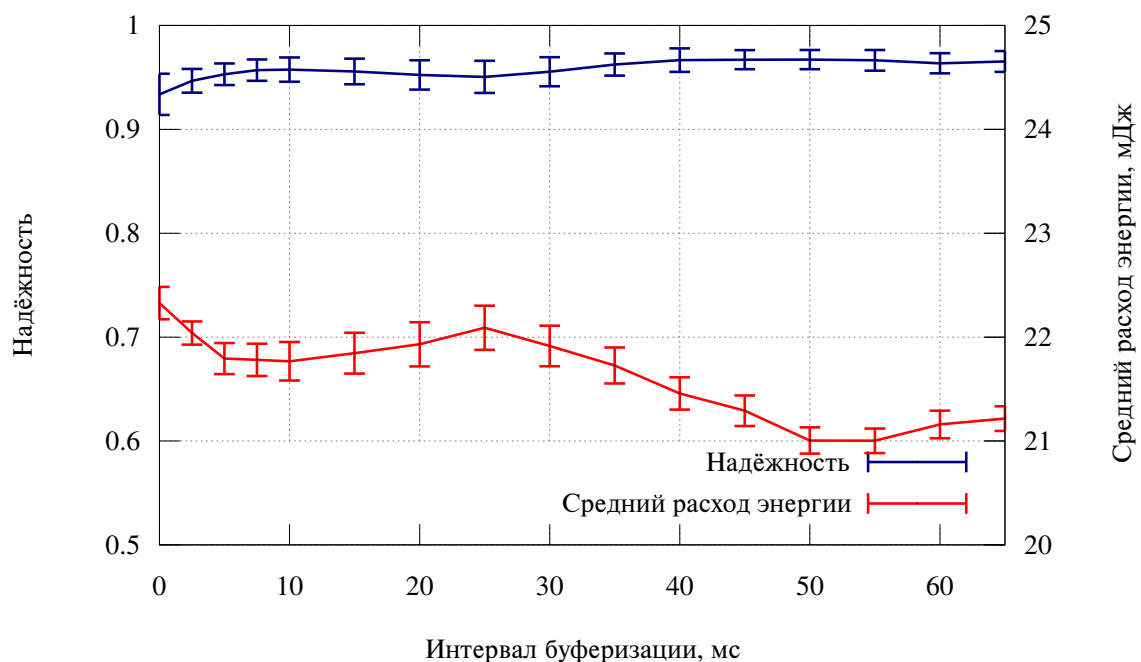


Рис. 5.7. Зависимость показателей работы от интервала буферизации

Графики, приведённые на рис. 5.7, показывают, что введение интервала буферизации (при $\phi_5=50$ мс) повышает надёжность и снижает расход энергии. Дальнейшее увеличение ϕ_5 приводит к повышению расхода энергии. Рациональное значение ϕ_5 должно быть выбрано с учётом характера

обслуживаемого объекта, особенностей топологии сети и других факторов при помощи имитационного моделирования.

Влияние буферизации на снижение нагрузки на расположенные близко к шлюзу ретрансляторы, проявляющееся в сокращении разброса среднего расхода энергии узлами, демонстрируют рис. 5.8 и 5.9.

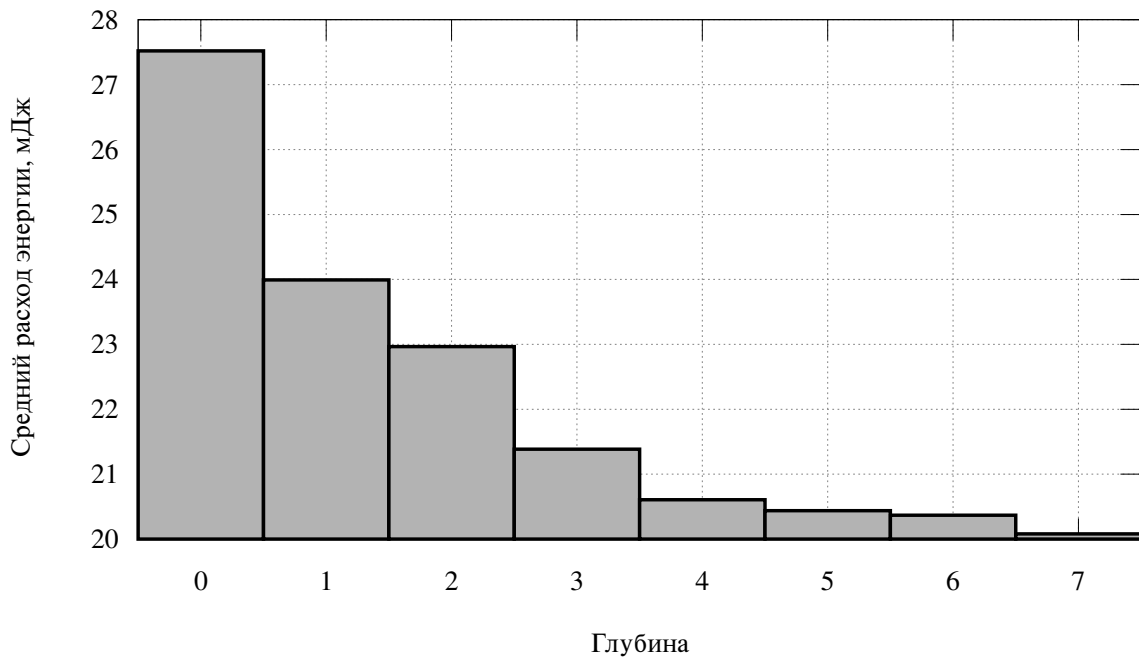


Рис. 5.8. Средний расход энергии узлами в зависимости от глубины без буферизации

5.4.5. Зависимость между качеством связи с родителем и предельным размером буфера

В методе функционирования БСС для космических систем используется буферизация результатов измерений, управляемая качеством связи с родителем, см. раздел 2.10. Это положение предусматривает накопление в буфере узла пересылаемых шлюзу результатов измерений и отправку их по истечении интервала буферизации (см. раздел 5.4.4) или по достижении предельного размера буфера. Такое накопление позволяет снизить нагрузку на радиоканал. Ранее было продемонстрировано, что вероятность успешной доставки сообщений тем выше,

чем они короче. Это различие в вероятности тем заметнее, чем ниже качество связи. Налицо две противоположные тенденции: отправки более длинных сообщений для снижения нагрузки на канал и отправки более коротких сообщений для повышения вероятности доставки. Компромиссом между этими тенденциями будет отправка сообщений максимального размера, обеспечивающая вероятность успешной доставки не хуже заданной.

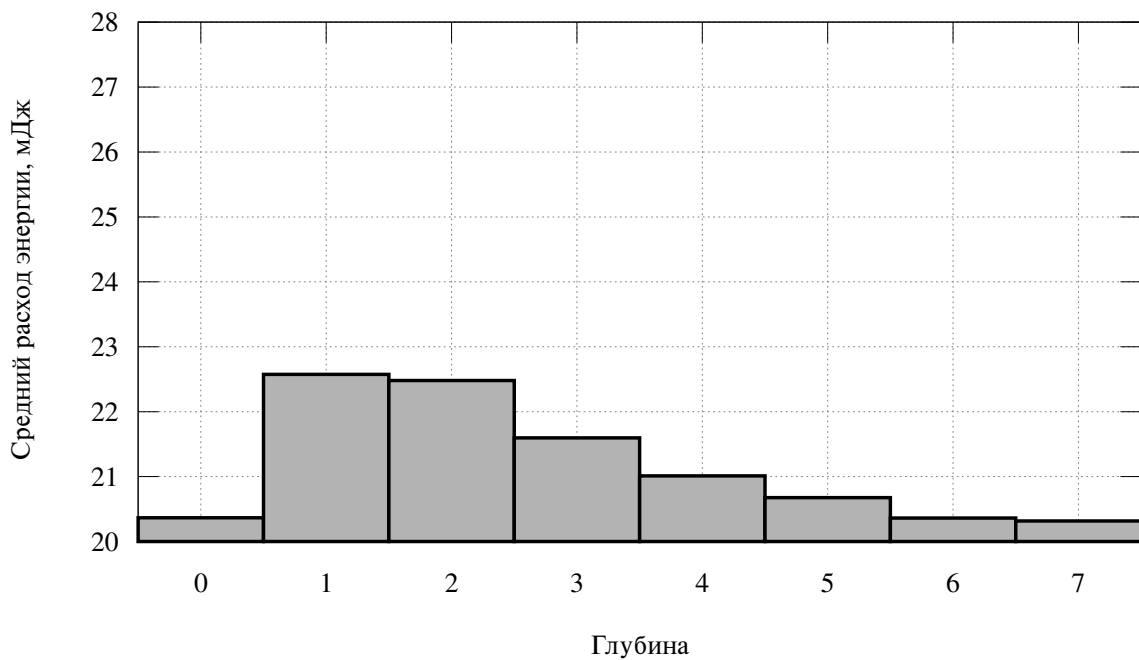


Рис. 5.9. Средний расход энергии узлами в зависимости от глубины с буферизацией

Требуется определить предельный размер буфера результатов измерений, включая стандартный заголовок сообщения, вероятность успешной пересылки которого не хуже заданной, при известном качестве связи. Ранее было получено выражение (3.133), при помощи которого можно вычислить предел заполнения буфера при известном качестве связи.

Вычисление выражений (3.128) и (3.133) не представляет трудности на универсальном компьютере, например, при имитационном моделировании работы БСС, однако на узле БСС вычисление этих выражений весьма затруднено. Дело в

том, что вследствие предъявляемого к процессорам узлов требования низкой стоимости они не имеют средств выполнения арифметических операций с плавающей точкой. Операции с плавающей точкой могут быть реализованы на узлах БСС путём программной эмуляции, что не эффективно. Выражения (3.128) и (3.133) на узлах БСС вычислены быть не могут, поэтому вместо вычисления этих выражений предлагается определять значение s^{limit} следующим методом.

Функцию $s(r, \hat{p})$, значение которой определяет верхний предел заполнения буфера, зададим таблично. Столбцы этой таблицы будут хранить значения функции для различных значений \hat{p} , а строки — значения функции для различных значений r . Значения функции $s(r, \hat{p})$ вычисляются в байтах. Значение m определяется константой `macMaxFrameRetries` стандарта IEEE 802.15.4: $m = \text{macMaxFrameRetries} + 1$; поэтому $m = 4$. Если требуемая вероятность \hat{p} задана жёстко (например, положена равной требуемой надёжности БСС в целом), то таблица значений $s(r, \hat{p})$ будет содержать только одну строку.

Пример табличного задания функции $s(r, \hat{p})$ для семи значений SINR, представленных в столбцах, и четырёх значений требуемой вероятности, представленных в строках, приведён в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Табличное задание функции $s(r, \hat{p})$ в байтах

	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
0.7	24	38	60	96	154	247	398
0.8	20	31	49	79	126	203	327
0.9	14	23	37	59	94	152	244
0.95	11	18	28	45	73	117	189

Во время работы узлы, используя установленный параметром ϕ_6 номер строки в таблице, определяющий заданную вероятность доставки сообщения, и измеренное значение качества связи, обращаются к таблице в памяти и находят предельный размер буфера. Если значение, найденное по таблице, меньше

минимально допустимого, это означает, что успешная доставка с заданной вероятностью не может быть обеспечена. Узлу придётся отправлять насколько возможно короткое сообщение. Если определённое по таблице значение превышает предельный размер сообщения, то должно быть отправлено сообщение с таким количеством результатов, длина которого не превосходит предельный размер. В табл. 5.1 использован серый цвет фона для обозначения ячеек, значения в которых выходят за пределы допустимого диапазона. Вместо значений функции $s(r, \hat{p})$, превышающих 127, в ячейки таблицы могут быть занесены значения 127, чтобы для их хранения хватало одного байта.

Размер данных, представленных в табл. 5.1, при хранении в оперативной памяти узлов БСС составляет 28 байт.

5.4.6. Защитный интервал АФС и АФР

При планировании работы узла моменты начала и окончания обеих активных фаз определяются с некоторым запасом. Узел просыпается немного ранее расчётного момента начала АФС. На АФР узел просыпается раньше и засыпает позже расчётного времени. Величина этого запаса согласно разделу 3.4.3 определяется исходя из величины защитного интервала АФС и АФР ϕ_7 .

К значению ϕ_7 предъявляются следующие противоречивые требования.

- С одной стороны, эта величина не должна быть слишком малой, чтобы узел не пропустил адресованные ему сообщения. В случае окончания АФР защитный интервал позволяет потомкам успеть передать результаты измерений до перехода узла в сон (задержка с их отправкой может быть вызвана повышенным уровнем конкуренции за канал). В начале АФР потомки некоторого узла могут начать передавать ему результаты измерений ранее расчётного момента времени в случае, когда они синхронизировали свои часы не с данным узлом, а с некоторым другим, а позднее получили сообщение с сетевой информацией от данного узла, приняли его, но согласно схеме работы часы повторно не синхронизировали.

- С другой стороны, эта величина не должна быть слишком большой, чтобы узел не проводил много времени в состоянии ожидания сообщений, непроизводительно расходуя запас энергии своего ИП.

Конкретная величина защитного интервала ϕ_7 может составлять до 1000 мкс. Для подтверждения корректности выбора ϕ_7 необходимо имитационное моделирование.

5.4.7. Продолжительность ожидания сообщения синхронизации

Параметр ϕ_8 используется в работе узла БСС для задания максимальной продолжительности ожидания сообщения с сетевой информацией Γ (см. раздел 3.4.6) в том случае, если этот узел ранее принимал сетевую информацию и ему известна периодичность T работы сети. По окончании устанавливаемого параметром ϕ_8 интервала ожидания узел переходит в режим сна до начала следующего периода работы БСС.

Выбор величины этого параметра преследует цель закончить неуспешную АФС как можно ранее, но, тем не менее, не пропустить сообщения синхронизации в том случае, если в результате изменения конфигурации обслуживаемого объекта узел оказался в таком месте, где он будет иметь большое значение глубины k .

Максимальная глубина узлов и среднее время, приходящееся на распространение сообщения Γ на один шаг в глубину, могут быть получены в результате имитационного моделирования. В качестве начального приближения параметр ϕ_8 может быть установлен равным смещению АФР шлюза.

Заметим, что неполучение узлом сообщения Γ приводит к пропуску этим узлом текущего периода работы, т. е. является нештатной ситуацией. Такие события отражаются в диагностической информации, см. (3.111) и рис. 4.4.

5.4.8. Начальная длительность и квант продления АФР

Параметр ϕ_9 определяет начальную длительность АФР узлов. При необходимости, в случае поступления сообщений с результатами измерений, АФР

может быть неоднократно продлена, см. рис. 3.7. Квант продления определяется параметром ϕ_{10} . Алгоритм работы узлов БСС, ориентированный на объекты обслуживания изменяемой конфигурации, не предусматривает возможности сокращения АФР в случае отсутствия сообщений. Поэтому время, которое узлы будут проводить на АФР, не менее ϕ_9 , см. (3.137).

Рассмотрим некоторый узел сети. После начала АФР его потомки, конкурируя за канал, начинают передачу ему накопленных ими результатов измерений. Таким образом, сообщения с результатами измерений группируются в начале АФР. При высоком уровне конкуренции за канал возрастают и задержки доступа к нему и, как показывает моделирование, доходят до 9 мс. Однако при низком качестве связи узла с его родителем сообщение может быть повреждено вследствие коллизии или воздействия помех. В этом случае оно будет отправлено повторно, что также увеличивает его смещение относительно начала АФР.

Выбор рациональных значений ϕ_9 и ϕ_{10} должен производиться по результатам имитационного моделирования или натурного эксперимента. В качестве начальных приближений могут быть выбраны значения из следующих диапазонов: $\phi_9 = 60 \div 140$ мс, $\phi_{10} = 5 \div 20$ мс.

На рис. 5.10 приведена зависимость надёжности БСС и среднего расхода энергии её узлами за один период работы от начальной продолжительности АФР при следующих условиях: 50 узлов равномерно распределены на площади 250x250 м, $T = 200$ с, $\phi_1 = 5$ мс, $\phi_2 = 3$, $\phi_3 = 50$ мс, $\phi_4 = 1$, $\phi_5 = 8$ мс, $\phi_6 = 0$, $\phi_7 = 0.5$ мс, $\phi_8 = 2$ с, $\phi_{10} = 20$ мс, $\phi_{11} = 60$ мс, 30 реализаций по 30 периодов работы в каждой. Доверительные интервалы построены для вероятности 0.95.

Рациональным выбором в этом случае будет значение $\phi_9 = 110$ мс, обеспечивающее надёжность 0.958 при среднем расходе энергии за период работы 22.5 мДж. Пусть узлы БСС укомплектованы двумя щелочными элементами питания типоразмера АА напряжением 1.5 В и запасом энергии 2.35 Вт·ч каждый [117]. Тогда средняя долговечность узлов составит более 1730 суток.

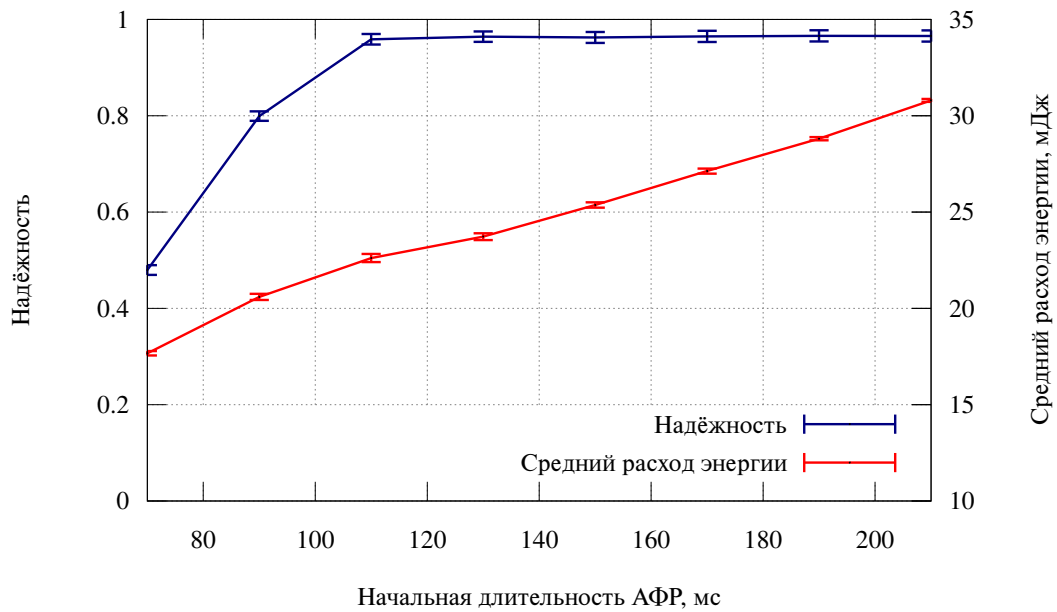


Рис. 5.10. Надёжность БСС и средний расход энергии узлами за один период работы в зависимости от начальной продолжительности АФР

На рис. 5.11 приведена зависимость надёжности БСС и среднего расхода энергии её узлами за один период работы от величины кванта продления АФР при следующих условиях: 50 узлов равномерно распределены на площади 250x250 м, $T=200$ с, $\phi_1=5$ мс, $\phi_2=3$, $\phi_3=50$ мс, $\phi_4=1$, $\phi_5=8$ мс, $\phi_6=0$, $\phi_7=0.5$ мс, $\phi_8=2$ с, $\phi_9=110$ мс, $\phi_{11}=60$ мс, 30 реализаций по 30 периодов работы в каждой. Доверительные интервалы построены для вероятности 0.95. Рациональным выбором в этом случае будет значение $\phi_{10}=10$ мс.

5.4.9. Смещение АФР родителя относительно потомка

Смещение АФР родителя относительно потомка задаётся параметром ϕ_{11} , устанавливаемым шлюзом во время работы БСС. Это смещение позволяет организовать пространственно-временную структуру взаимодействия узлов. При выборе значения ϕ_{11} должны быть учтены следующие обстоятельства.

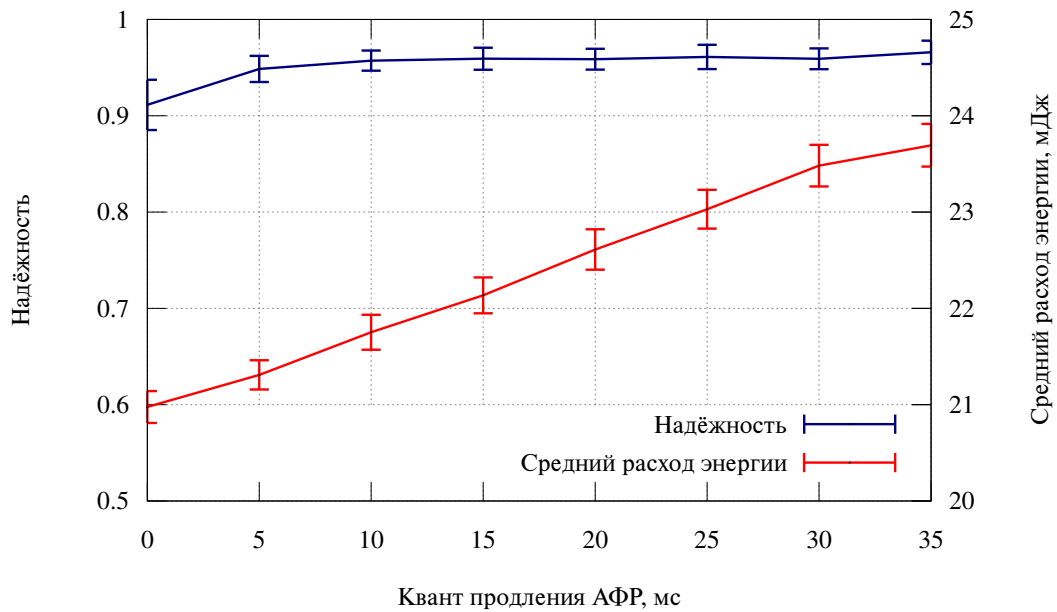


Рис. 5.11. Надёжность БСС и средний расход энергии узлами за один период работы в зависимости от кванта продления АФР

1. Разделение АФР на две части, в первой из которых узел только принимает сообщения, а во второй — принимает и передаёт их дальше (см. рис. 2.8), позволяет сократить количество передаваемых по сети сообщений с помощью их буферизации. Поэтому величина ϕ_{11} должна в несколько раз превосходить интервал буферизации ϕ_5 .
2. Величина ϕ_{11} не должна превышать половины ϕ_9 .
3. Применение СЗР предполагает, что максимальная задержка укладывается в активную фазу. Это накладывает ограничение на ϕ_{11} :

$$\phi_{11} < \phi_9 - \phi_3. \quad (5.7)$$

На рассмотренных ранее графиках, приведённых на рис. 5.10, условие (5.7) выполняется только при АФР от 110 мс и более. Для АФР меньшей продолжительности невыполнение условия (5.7) привело к снижению надёжности.

Для окончательного выбора рационального значения ϕ_{11} следует прибегнуть к имитационному моделированию или натурному эксперименту. На

рис. 5.12 показаны результаты имитационного моделирования при следующих условиях: 50 узлов равномерно распределены на площади 250x250 м, $T=200$ с, $\phi_1=5$ мс, $\phi_2=3$, $\phi_3=50$ мс, $\phi_4=1$, $\phi_5=8$ мс, $\phi_6=0$, $\phi_7=0.5$ мс, $\phi_8=2$ с, $\phi_9=150$ мс, $\phi_{10}=20$ мс, 30 реализаций по 30 периодов работы БСС в каждой. Доверительные интервалы построены для вероятности 0.95.

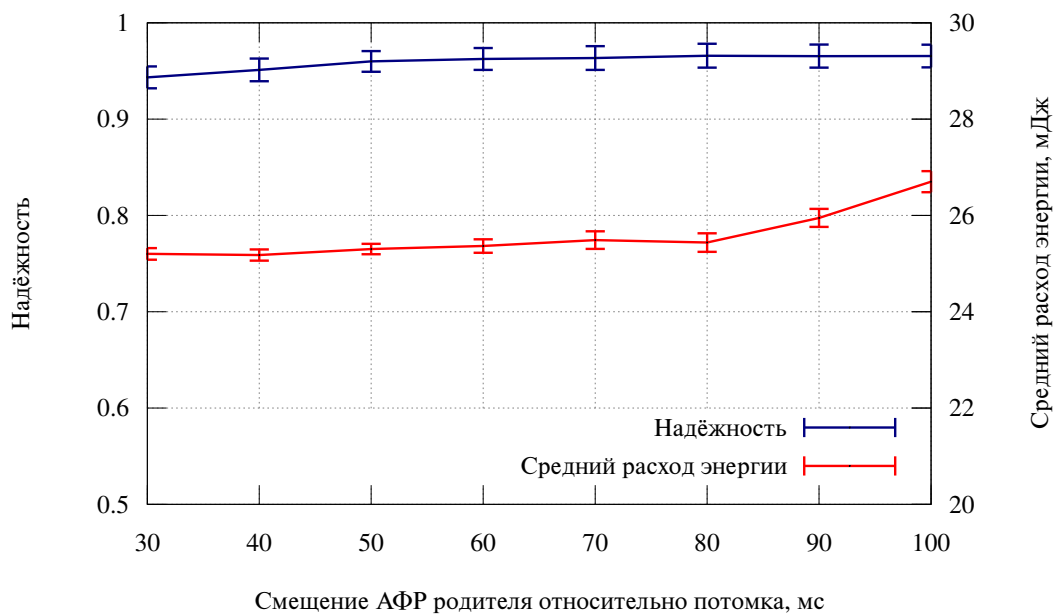


Рис. 5.12. Надёжность БСС и средний расход энергии узлами за один период работы в зависимости от смещения АФР родителя относительно потомка

5.4.10. Параметры выбора смещения АФР шлюза

В выражение (3.141), при помощи которого определяется смещение АФР шлюза, входят два параметра: ϕ_{12} — запас по глубине и ϕ_{13} — запас времени на распространение сетевой информации от шлюза до узла максимальной глубины.

Необходимость введения запаса ϕ_{12} объясняется тем, что определённое во время работы значение максимальной глубины k_{\max} используется на следующем периоде работы, т. е. после продолжительной второй фазы сна. Вследствие нестационарности объекта обслуживания конфигурация БСС может измениться, и

ранее определённое значение k_{\max} может теперь оказаться недостаточным. Во избежание этого необходим определённый запас по глубине.

При плавном увеличении максимальной глубины, при котором приращение глубины за один период не превышает величины ϕ_{12} , этот запас позволяет избежать потерь данных. При резком увеличении максимальной глубины происходит временная потеря части результатов измерений. При последующем снижении максимальной глубины алгоритм снизит φ .

Завышение значения ϕ_{12} приводит к увеличению промежутка между АФС и АФР, что может отрицательно сказаться на качестве работы сети при обслуживании объекта с быстро изменяющейся конфигурацией.

Решение о значении параметра ϕ_{12} может быть принято по результатам исследования свойств объекта обслуживания, имитационного моделирования или натурального эксперимента. В качестве начального приближения может быть рекомендовано значение из диапазона $\phi_{12} = 4 \div 10$.

Необходимость использования запаса ϕ_{13} вызвана тем, что перейти к АФР может только узел, получивший сетевую информацию. Следовательно, должно быть предусмотрено время на её распространение. Величина ϕ_{13} может быть определена на основании собранной в результате имитационного моделирования или натурального эксперимента статистики. На рис. 5.13 показано распределение фактического времени, понадобившегося БСС из 50 узлов, равномерно распределённых на площади 250x250 м, для АФС. Меньшим значениям длительности АФС соответствуют меньшие глубины, большим значениям соответствуют большие глубины. Чтобы предоставить узлам любой глубины возможность обработать сообщение синхронизации, в качестве ϕ_{13} должно быть выбрано наибольшее значение, в данном случае — 60 мс.

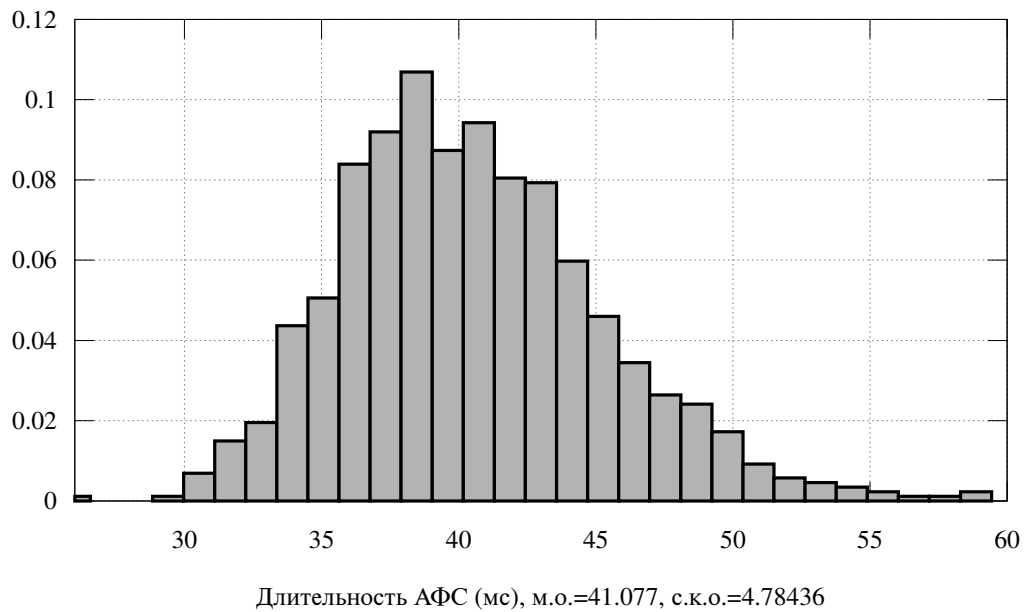


Рис. 5.13. Распределение длительности АФС узлов сети

5.5. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование работы БСС выполняется при помощи рассмотренного в четвёртой главе симулятора. Все подготовленные исходные данные, а именно:

- период работы сети T ;
- модель объекта обслуживания Ω , включая модель потерь M ;
- количество N узлов БСС и их размещение;
- параметры аппаратуры узлов H ;
- параметры работы Φ

поступают на вход симулятора. Результатом моделирования являются значения показателей надёжности R и долговечности D , см. рис. 4.5. Если моделирование выполняется не до выхода БСС из строя вследствие исчерпания запаса энергии ИП, то по окончании моделирования значение долговечности не известно. В этом случае вместо долговечности можно использовать средний

расход энергии узлами за один период работы сети, см. рис. 4.7. Меньшая величина расхода энергии соответствует большей долговечности сети.

Однако значения показателей работы БСС не позволяют узнать, какими событиями сопровождалась её работа. Для установления причинно-следственных связей между событиями, анализа причин снижения значений показателей работы БСС могут быть использованы диагностическая информация и журнал симулятора, см. раздел 4.4.5. Диагностическая информация W позволяет узнать, какие узлы остались вне сети и не выполнили измерения, какие результаты измерений не были доставлены шлюзу. Если диагностической информации для анализа работы БСС не достаточно, следует прибегнуть к изучению журнала симулятора.

При необходимости могут быть внесены изменения в подготовленные ранее исходные данные. После этого моделирование должно быть выполнено заново. Такой процесс может повторяться многократно до получения удовлетворительных результатов.

В пятой главе работы представлена итерационная методика структурно-параметрического синтеза БСС для космических систем. Методика включает в себя:

- подготовку модели объекта обслуживания,
- создание связной сети,
- выбор типа источников питания узлов,
- выбор значений параметров работы БСС,
- определение показателей работы БСС при помощи представленного в четвёртой главе симулятора.

Глава 6. Проектирование системы коммуникаций внутри группировки научных наноспутников

В настоящей главе на основе результатов предшествующих глав диссертации решается важная научно-техническая задача проектирования системы коммуникаций внутри орбитальной группировки научных наноспутников, предназначенной для экспериментального исследования задержек распространения сигналов ГЛОНАСС в ионосфере. Согласно изложенным в предшествующих главах результатам, вначале представлена разработка баллистической модели орбитальной группировки наноспутников, которая далее выступает в роли исходных данных для анализа и выбора параметров проектируемой БСС именно для названной задачи. Затем по этим данным настраиваются предложенные алгоритмы функционирования БСС и её имитационная модель, с использованием которой выбираются рациональные значения параметров работы БСС, показывается преимущество БСС предложенного класса в сравнении с возможными альтернативами по значению критического показателя — по величине расхода энергии.

6.1. Группировка наноспутников

Одним из требований, предъявляемых к глобальной навигационной спутниковой системе (ГЛОНАСС), является высокая точность навигационно-временного обеспечения (НВО). Среди прочих факторов на точность НВО влияет состояние ионосферы: оно определяет задержки распространения сигналов от навигационных спутников до приёмников, внося ошибки в работу алгоритмов позиционирования. Информация о текущем состоянии ионосферы позволяет снизить величину этих ошибок. Состояние ионосферы исследуют как при помощи наземных измерений [66, 118-120], так и при помощи орбитальных группировок [121-124].

Ниже представлено решение задачи проектирования системы коммуникаций внутри группировки научных наноспутников, исследующей задержки распространения сигналов навигационных спутников при их прохождении через слой F_2 ионосферы. При проектировании системы коммуникации используются результаты, полученные в предыдущих главах работы.

6.1.1. Задача исследования

Условия прохождения радиоволн через ионосферу полностью определяются электронной концентрацией, т. е. количеством свободных электронов в единице объёма. Образование ионов и свободных электронов (ионизация) происходит под действием излучения Солнца, космических лучей, частиц и метеороидов. Величина электронной концентрации определяет групповую скорость $v_{гр}$ распространения электромагнитной волны частоты f [66]:

$$v_{гр} = c \sqrt{1 - 80,8 N / f^2}, \quad (6.1)$$

где c — скорость света в вакууме, N — электронная концентрация. Распределение электронной концентрации в ионосфере не постоянно; оно подвержено годовым, сезонным, суточным и другим колебаниям, а также случайным возмущениям. Результатом наличия в ионосфере областей с различными значениями электронной концентрации является отклонение распространения радиоволн от прямолинейного. Изменение скорости распространения электромагнитных волн (6.1) и их непрямолинейное распространение приводят к нерасчетным запаздываниям, что при приёме сигналов глобальных навигационных систем ведёт к ошибкам позиционирования. Для парирования таких ошибок применяются модели ионосферы, предсказывающие распределение электронной концентрации.

Модели ионосферы, например, International Reference Ionosphere (IRI), учитывают широту и долготу, суточные, сезонные, годовые колебания, циклическую солнечную активность. Но такие модели не в состоянии прогнозировать возмущения ионосферы, возникающие вследствие внезапного

изменения солнечной активности, межпланетного магнитного поля, магнитного поля Земли, прохождения погодных фронтов, землетрясений, извержений вулканов, техногенных воздействий — мощного излучения, взрывов, выбросов химических веществ [125]. Обновление моделей ионосферы в оперативном режиме производится по результатам исследования её фактического состояния наземными ионосферными станциями, включая станции радиотомографии.

Радиотомография (РТ) ионосферы заключается в измерении приёмником разности фаз двух когерентных, но различающихся по частоте сигналов одного передатчика. Измеренная разность фаз позволяет определить полное электронное содержание⁹ (ПЭС) на пути сигнала от передатчика до приёмника [119]. В качестве источников таких сигналов часто используются навигационные спутники, так как они излучают когерентные, формируемые от общего стандарта частоты сигналы. Спутник ГЛОНАСС излучает навигационные радиосигналы на частотах $f_1=1602,0+0,5625k$ МГц и $f_2=1246,0+0,4375k$ МГц, где k — номер используемой данным спутником частоты. Для спутников GPS $f_1=1575,42$ МГц и $f_2=1227,60$ МГц.

Для реконструкции пространственного распределения N необходимо наличие нескольких одновременно полученных значений ПЭС $_i, i=\overline{1, n}$, соответствующих путям L_i , проходящим через исследуемую область.

Наземные станции РТ, принимая сигналы многих навигационных спутников, собирают сведения о состоянии ионосферы над ними и преобразуют их в величину ионосферных задержек, используемую для повышения точности позиционирования. Однако сеть станций РТ отсутствует над поверхностью океанов и в труднодоступных местах Земли. Кроме того, доступ к данным находящимся за пределами России станций РТ может быть ограничен. В этом

9 Полным электронным содержанием называется количество электронов в (возможно, непрямолинейном) столбе с сечением единичной площади вдоль траектории от передатчика до приёмника.

случае возрастут ошибки позиционирования использующих ГЛОНАСС потребителей при их работе за границей.

Для недопущения подобного снижения точности позиционирования предлагается рассмотреть возможность использования вместо наземной сети станций РТ спутниковой группировки, КА которой выполняют функции приёмников навигационных сигналов. Для практического подтверждения возможности использования спутниковой группировки РТ ионосферы вместо наземной сети станций предлагается проведение космического эксперимента (КЭ) «Сеть РТ», в ходе которого должна быть развёрнута компактная ОГ наноспутников, оснащённых фазовыми интерферометрами.

КЭ «Сеть РТ» предполагает одновременное измерение ПЭС вдоль нескольких проходящих через исследуемую область траекторий между навигационными космическими аппаратами (НКА) и наноспутниками (НС) ОГ, рис. 6.1. Момент выполнения измерений и список номеров НКА предварительно определяется на наземном командном пункте (НКП) и доводится до всех НС. Результаты измерений ПЭС передаются для обработки на НКП, где решается задача восстановления пространственного распределения N в исследуемой области.

При проведении КЭ «Сеть РТ» предлагается ограничиться исследованием слоя F_2 ионосферы, так как он подвержен наибольшей ионизации и в нем присутствуют сильные возмущения [125]. Для остальных слоёв ионосферы и плазмосферы должны использоваться существующим модели.

Опорная орбита группировки должна быть круговой с высотой 400 км. Количество НС как компромисс между точностью восстановления распределения электронного содержания и условиями выведения группировки составляет 24. Все НС должны располагаться в области размером 50 км (вдоль опорной орбиты) \times 15 км \times 15 км. Взаимодействие с НКП должен осуществлять только лидер ОГ, остальные НС (спутники) должны получать команды и передавать на НКП результаты своих измерений через локальную систему коммуникации ОГ. Для

предотвращения нарушения компактности ОГ НС должны быть оснащены двигательной установкой (ДУ). Формат НС — Cubesat 1U.

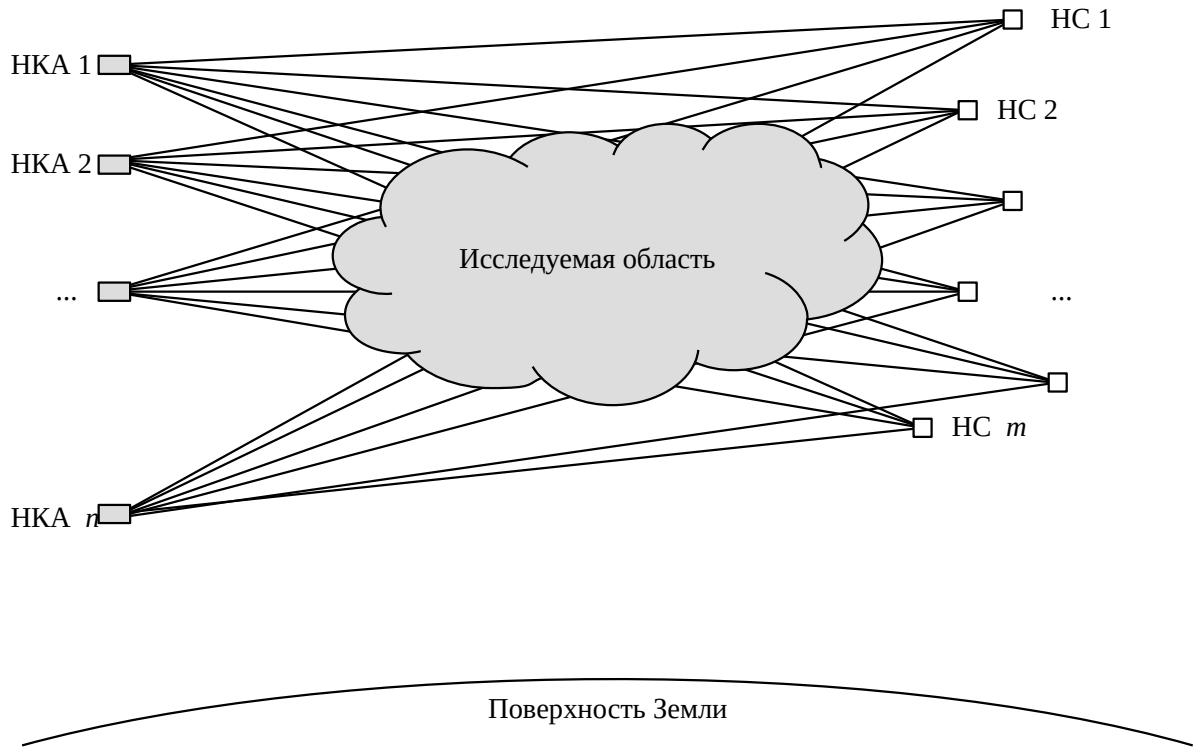


Рис. 6.1. Схема КЭ «Сеть РТ»

6.1.2. Наноспутники

Орбиты наноспутников некомпланарны, рис. 6.2. В момент выведения пакета наноспутников требование компактности ОГ соблюдается, но с течением времени под действием возмущений аппараты отдаляются друг от друга. Коррекция их орбиты для поддержания компактности группировки осуществляется при помощи двигательной установки. Все наноспутники группировки делятся на два типа — лидер и спутники.

Лидер оснащён целевой научной аппаратурой (ЦНА) — фазовым интерферометром, радиоаппаратурой малой мощности для связи с спутниками, радиоаппаратурой и антенной системой для связи с НКП, приёмным модулем сигналов ГЛОНАСС. С целью снижения массы в составе лидера отсутствует ДУ. Функции лидера:

- получение команд от НКП на выполнение измерений,
- доведение команд на выполнение измерений до спутников,
- выполнение собственных измерений,
- приём от спутников результатов измерений и передача их в НКП.

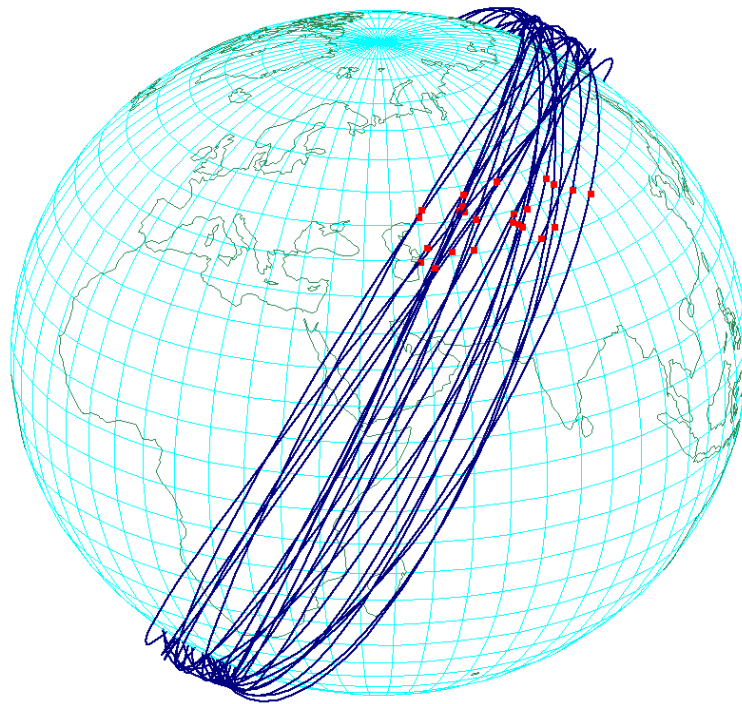


Рис. 6.2. Орбиты наноспутников группировки. Для наглядности отклонения орбит наноспутников друг от друга увеличены в 100 раз

Сателлиты оснащены ЦНА, радиоаппаратурой малой мощности для связи с другими спутниками и лидером, приёмным модулем сигналов ГЛОНАСС, ДУ с запасом рабочего тела. С целью снижения массы в составе спутника отсутствует радиоаппаратура и антенная система для связи с НКП. Функции спутника:

- приём команд от лидера на выполнение измерений,
- выполнение собственных измерений,

- передача результатов собственных измерений,
- ретрансляция результатов измерений других спутников,
- коррекция орбиты при нарушении компактности группировки.

Источником энергии для лидера и спутников является солнечный свет, при помощи фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) превращаемый в электрическую энергию. Основным потребителем энергии на спутнике является ДУ. Например, при использовании ДУ Orbital Thruster компании Augora при создании тяги 2 мН потребляется 5 Вт [24]. Следовательно, для создания импульса длительностью 100 с требуется 500 Дж. Ограниченные размер и масса наноспутника не позволяют использовать ФЭП площади, достаточной для непрерывной работы всей аппаратуры наноспутника, включая ДУ. Например, солнечные батареи «1U SOLAR PANEL X/Y» компании EnduroSat, созданные специально для наноспутников формата Cubesat 1U, обеспечивают электрическую мощность менее 2.41 Вт [23]. Поэтому для накопления необходимого для проведения коррекции количества энергии вырабатываемая электрическая энергия аккумулируется в течение длительного времени. При накоплении достаточного количества энергии спутник может провести необходимую коррекцию орбиты. На лидере при отсутствии ДУ наибольшее количество энергии потребляет аппаратура связи с НКП. ДУ на спутнике и аппаратура связи с НКП на лидере являются критически важными потребителями энергии на наноспутниках группировки. Следовательно, для обеспечения работы критически важных потребителей вся остальная аппаратура наноспутника должна потреблять минимально необходимое количество энергии.

Функциональные схемы лидера и спутника приведены на рис. 6.3 и рис. 6.4 соответственно.

Объектом настоящей разработки является система коммуникаций внутри группировки наноспутников. Её информационные потоки показаны на рис. 6.5. Во время сеанса связи с НКП последний передаёт лидеру план измерений — перечень моментов времени, соответствующих прохождению группировкой

представляющих интерес областей ионосферы, и списки выбранных НКА. Заблаговременно, учитывая дискретность связи с спутниками, лидер передаёт им запросы на выполнение измерений. Запросы передаются в широкополосном режиме. Пространственно отдалённым спутникам запросы поступают в результате ретрансляции через один или несколько промежуточных спутников.



Рис. 6.3. Функциональная схема лидера



Рис. 6.4. Функциональная схема спутника

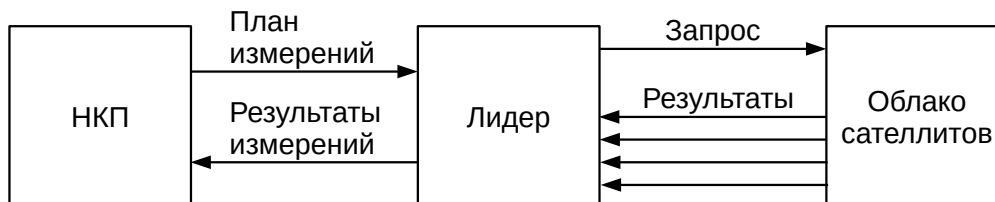


Рис. 6.5. Информационные потоки системы коммуникации внутри группировки спутников

Выполнив измерения, спутники передают их результаты лидеру. При этом близко расположенные спутники ретранслируют сообщения отдалённых. Собранные результаты измерений, лидер накапливает их для последующей передачи в НКП.

Сформулированное выше требование минимального потребления энергии в полной мере применимо и к системе коммуникаций внутри группировки наноспутников. Поэтому для неё актуальны те же проблемы (обеспечение заданной надёжности при минимальном потреблении энергии), которые привели к разработке класса БСС для космических систем. Следовательно, при проектировании системы коммуникации внутри группировки наноспутников будем в качестве основы использовать БСС этого класса. Лидер будет выполнять функции шлюза, а спутники — измерителей.

6.2. Постановка задачи проектирования системы коммуникаций и исходные данные

Требуется разработать проект системы коммуникаций внутри группировки наноспутников (СКГН), функциями которой являются:

- передача спутникам запросов на выполнение измерений,
- сбор, первичная обработка и передача лидеру результатов измерений спутников.

Исходными данными для проектирования СКГН являются требуемая периодичность работы, количество узлов и их положение. Минимальная надёжность сбора результатов измерений также задана. Однако в этих исходных данных отсутствуют необходимые для проектирования параметры аппаратуры СКГН, перечисленные в табл. 3.1 (на рис. 6.3 и 6.4 эта аппаратура выделена серым цветом). Для определения их значений должны быть выбраны аппаратные компоненты с учётом особенностей рассматриваемой КС.

Ранее было продемонстрировано, что показатели работы системы на основе дискретной БСС определяющим образом зависят от параметров Φ работы БСС, перечисленных в табл. 3.2. Поэтому при проектировании должны быть

определены значения этих параметров, обеспечивающих требуемые значения показателей работы.

Таким образом, в результате проектирования подсистемы управления измерениями должны быть определены:

- параметры аппаратуры СКГН,
- значения управляющих параметров БСС, на основе которой создаётся СКГН.

Исходные данные для проектирования представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исходные данные для проектирования СКГН

Параметр	Значение
Параметры опорной орбиты группировки наноспутников	Большая полуось $a=6771$ км , эксцентриситет $e=0$, наклонение $i=60^\circ$, долгота восходящего узла $\Omega=30^\circ$
Количество наноспутников в группировке	24
Предельные размеры группировки	15 x 15 x 60 км
Формат наноспутника	Cubesat 1U
Масса наноспутника	2.5 кг
Размер данных одного измерения целевой аппаратуры	22 байта 30 байт (с учётом средней аномалии, см. раздел 6.4.2)
Размер данных одного измерения координат наноспутника	48 байт
Периодичность выполнения измерений целевой аппаратуры, не реже	180 с
Надёжность сбора результатов измерений, не менее	0.9

6.3. Выбор аппаратуры СКГН

Указанные в табл. 6.1 исходные данные для проектирования СКГН не конкретизируют радиоаппаратуру, обеспечивающую связь внутри группировки. Поэтому начнём проектирование с выбора этой аппаратуры, а затем характеристиками выбранной аппаратуры дополним исходные данные для проектирования.

С целью сокращения затрат и сроков разработки и производства наноспутников, а также учитывая небольшой срок эксплуатации группировки при выборе компонентов радиоаппаратуры СКГН будем использовать изделия COTS. Характеристики некоторых из имеющихся на рынке моделей трансиверов и модулей на их основе приведены в табл. 6.2.

Дальность связи с использованием радиоканала при отсутствии помех зависит от отношения мощности передатчика к чувствительности приёмника. Мощность передатчика и чувствительность приёмника выражены в децибелах, т. е. являются логарифмическими величинами. Отношению исходных величин соответствует разность их логарифмов. Данные таблицы 6.2 показывают, что наилучшими значениями этого отношения (от 122 до 127 дБ) обладают интегрированные модули в составе микропроцессора, трансивера и усилителя мощности. Однако эти модули предусматривают использование только проприетарного программного обеспечения. Например, модуль ATZB-A24-U0 предусматривает использование стека протоколов BitCloud [132] или SerialNet [133]. Эти стеки протоколов не совместимы со схемой работы узлов БСС для космических систем.

Принципиальные схемы интегрированных модулей не публикуются, поэтому разработать для них программное обеспечение, напрямую взаимодействующее с микропроцессором и трансивером модуля взамен предлагаемого производителем стека протоколов, невозможно. Следовательно, использование интегрированных модулей для создания СКГН не приемлемо.

Таблица 6.2

Характеристики промышленно выпускаемых трансиверов стандарта IEEE 802.15.4 диапазона 2.4 ГГц

Модуль (производитель, модель)	Тип	Мощность передатчика, дБмВт	Чувствительность приёмника, дБмВт	Разработка независимых приложений	Ток потребления, мА, RX / TX
Texas Instruments CC2420 [32]	Трансивер	0	-94	Да	19.7 / 17.4
Texas Instruments CC2520 [33]	Трансивер	5	-98	Да	18.5 / 33.6
Atmel AT86RF230 [126]	Трансивер	3	-101	Да	15.5 / 16.5
Microchip MRF24J40 [127]	Трансивер	0	-95	Да	19 / 23
Atmel ATZB-A24-U0 [128]	Микропроцессор + трансивер + усилитель	20	-104	Ограничена	23 / 50
California Eastern Laboratories ZICM357SP2 [129]	Микропроцессор + трансивер + усилитель	20	-103	Ограничена	34 / 150
Dresden Elektronik deRFmega256-23M12 [130]	Микропроцессор + трансивер + усилитель	23	-104	Ограничена	22 / 233
Sena Technologies ProBee- ZE10 [131]	Микропроцессор + трансивер + усилитель	20	-102	Ограничена	45 / 190

Поэтому для связи внутри группировки предложено использовать отдельные компоненты: обладающий наибольшей дальностью связи трансивер Atmel AT86RF230 в сочетании с усилителем мощности, например, Texas Instruments CC2595 с коэффициентом усиления 20 дБ [134]. Это позволит передавать сообщения между узлами, потери на распространение между которыми составляют до 124 дБ. Для экономии энергии усилитель мощности должен включаться только на время передачи сообщений.

В качестве микропроцессора узла, управляющего работой СКГН на основе БСС для космических систем, выберем обладающий необходимой вычислительной мощностью и низким потреблением энергии MSP430F5438A [55].

Потребление тока микросхемой CC2595 составляет 98 мА в режиме передачи, когда усилитель мощности включён, и 1 мкА в выключенном режиме. Таким образом, суммарное потребление энергии трансивера AT86RF230 и усилителя мощности CC2595 составляет 15.5 мА в режиме приёма, 114.5 мА в режиме передачи и 1 мкА в режиме сна.

Необходимые для проектирования БСС для космических систем значения параметров аппаратуры узлов приведены в табл. 6.3.

6.4. Проектирование СКГН

В соответствии с представленной в пятой главе методикой проектирование СКГН на основе БСС для космических систем состоит из следующих этапов:

- подготовка модели объекта обслуживания,
- обеспечение связности беспроводной сети,
- выбор типа ИП узлов,
- выбор рациональных значений параметров работы,
- имитационного моделирования при помощи симулятора, представленного в четвёртой главе, адаптированного для моделирования СКГН.

Обозначение	Параметр	Значение
I_{MCU}^{work}	Ток потребления микропроцессора MSP430F5438A в режиме работы	8.9 мА
I_{MCU}^{sleep}	Ток потребления микропроцессора MSP430F5438A в режиме сна	1.2 мкА
I_{TRX}^{RX}	Ток потребления трансивера AT86RF230 в режиме приёма	15.5 мА
I_{TRX}^{TX}	Ток потребления трансивера AT86RF230 и усилителя мощности CC2595 в режиме передачи	114.5 мА
I_{TRX}^{sleep}	Ток потребления трансивера AT86RF230 и усилителя мощности CC2595 в режиме сна	1 мкА
s	Размер результатов измерений узла	22 байта (30 байтов, см. раздел 6.4.2)
P^{TX}	Мощность сигнала, излучаемого узлом	23 дБ
P^{RXmin}	Чувствительность трансивера в режиме приёма	-101 дБ

Рассмотрим содержание названных этапов проектирования СКГН.

6.4.1. Подготовка модели объекта обслуживания

Согласно (3.1) модель объекта обслуживания состоит из множества его составных частей, множества помех и модели потерь при распространении радиоволн. В данном случае материальные составные части объекта обслуживания, кроме самих наноспутников, отсутствуют. Помехи в используемом диапазоне радиоволн также отсутствуют. Наноспутники формата Cubesat 1U предполагается оснастить раскрывающимися антеннами для связи внутри группировки. Поэтому влиянием самих наноспутников на распространение

радиоволн можно пренебречь. Следовательно, создание геометрических моделей частей не требуется, и подготовка модели объекта сводится к выбору СК и модели потерь при распространении радиоволн.

Для характеристики положения спутников в группировке вводится связанная с лидером орбитальная СК [135]. Вследствие малости размеров группировки относительно орбиты эта СК — декартова. Начало связанной орбитальной СК (СОСК) группировки совпадает с положением лидера. Ось абсцисс X_S СОСК направлена по радиус-вектору от центра Земли. Ось ординат Y_S лежит в плоскости орбиты, нормальна оси абсцисс, образует с вектором скорости острый угол. Ось аппликат Z_S дополняет тройку до правой, см. рис. 6.6.

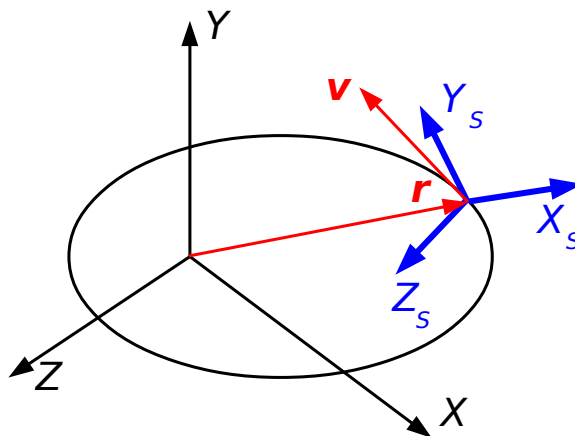


Рис. 6.6. Орбитальная СК

Обозначим вектор состояния в геоцентрической экваториальной СК (ГЭСК) как \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = (r_x, r_y, r_z, v_x, v_y, v_z)^T, \quad (6.2)$$

где r_x, r_y, r_z — компоненты вектора положения \mathbf{r} , v_x, v_y, v_z — компоненты вектора скорости \mathbf{v} . Вектор состояния наноспутника в СОСК обозначим $\bar{\mathbf{x}}$. Переход от ГЭСК, в которой наноспутники получают свои координаты и скорость от приёмника ГЛОНАСС, к СОСК выполняется при помощи выражения

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{M}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (6.3)$$

где x_0 — вектор координат лидера в ГЭСК, M — блочная матрица перехода [135]. В соответствии с (3.11) положение узлов БСС совпадает с положением наноспутника и определяется выражением (6.3).

В качестве модели потерь при распространении радиоволн должна быть использована модель потерь в свободном пространстве, определяемая выражением (3.43). Погрешности этой модели, проявляющиеся на малом расстоянии между узлами, для СКГН не существенны.

Таким образом

$$\Omega = (\emptyset, \emptyset, (3.43)) . \quad (6.4)$$

6.4.2. Обеспечение связности сети

Связность беспроводной сети группировки наноспутников обеспечивается сочетанием размеров группировки с количеством наноспутников и возможностью осуществления связи между узлами в случае, когда потери не превосходят 124 дБ (эта величина была определена в разделе 6.3). При отсутствии помех модель потерь в свободном пространстве (3.43) позволяет осуществлять связь между узлами на расстоянии до 15.4 км. После выведения на исходные орбиты лидера и спутников они образуют компактную группировку, в которой радиосвязь между узлами возможна.

Параметры исходных орбит лидера и спутников представлены в табл. 6.4. Проекция невозмущённых орбит, созданных в соответствии с данными табл. 6.4, на плоскости СОСК для 23 спутников (лидер постоянно находится в начале СК) показаны на рис. 6.7-6.9.

Параметры исходных орбит наноспутников группировки

Параметр орбиты	Лидер	Сателлиты
Большая полуось a	$a_0 = 6771000$ м	$a = a_0$
Эксцентриситет e	$e_0 = 0.001$	$e = e_0 + \delta e$, $\delta e \sim U(0, 1.1 \cdot 10^{-3})$
Долгота восходящего узла Ω	$\Omega_0 = 30^\circ$	$\Omega = \Omega_0 + \delta \Omega$, $\delta \Omega \sim U(-3.3 \cdot 10^{-4}, 3.3 \cdot 10^{-4})$
Наклонение i	$i_0 = 60^\circ$	$i = i_0 + \delta i$, $\delta i \sim U(-1.1 \cdot 10^{-3}, 1.1 \cdot 10^{-3})$
Аргумент перигея ω	$\omega_0 = 45^\circ$	$\omega \sim U(0^\circ, 360^\circ)$
Истинная аномалия ϑ	$\vartheta_0 = 45^\circ$	$\vartheta = \omega_0 - \omega + \vartheta_0 + \delta \vartheta$, $\delta \vartheta \sim U(-1.95 \cdot 10^{-3}, 1.95 \cdot 10^{-3})$

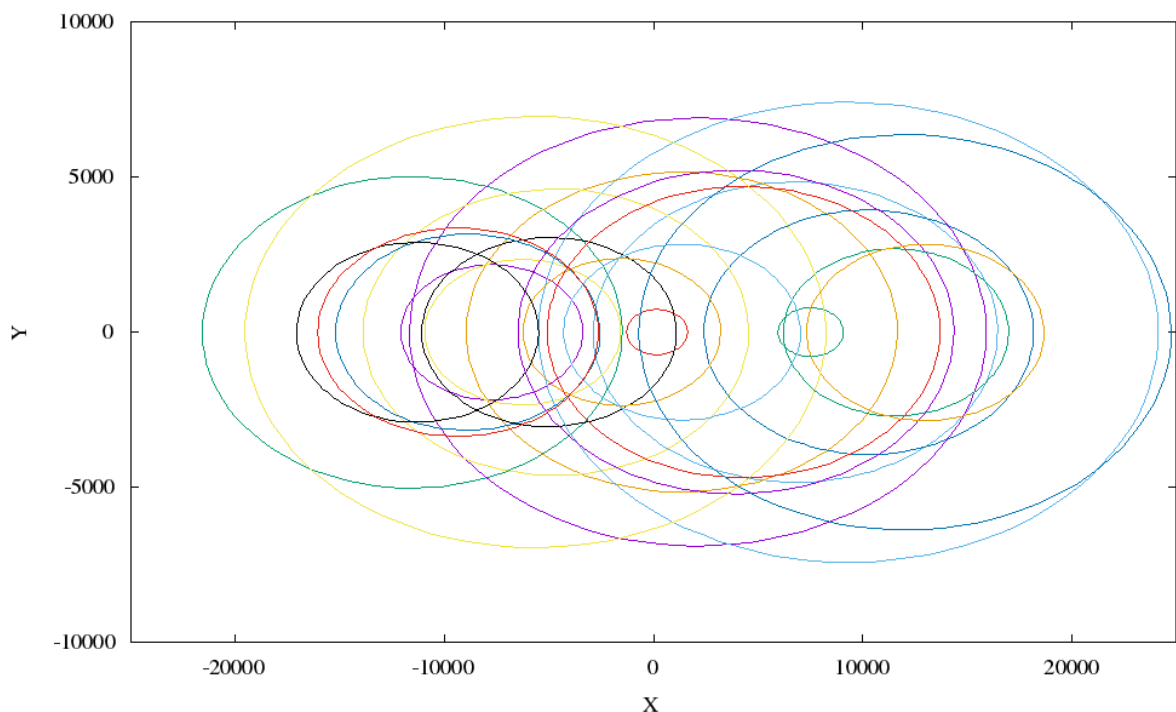


Рис. 6.7 Проекция орбит наноспутников на плоскость XY СОСК

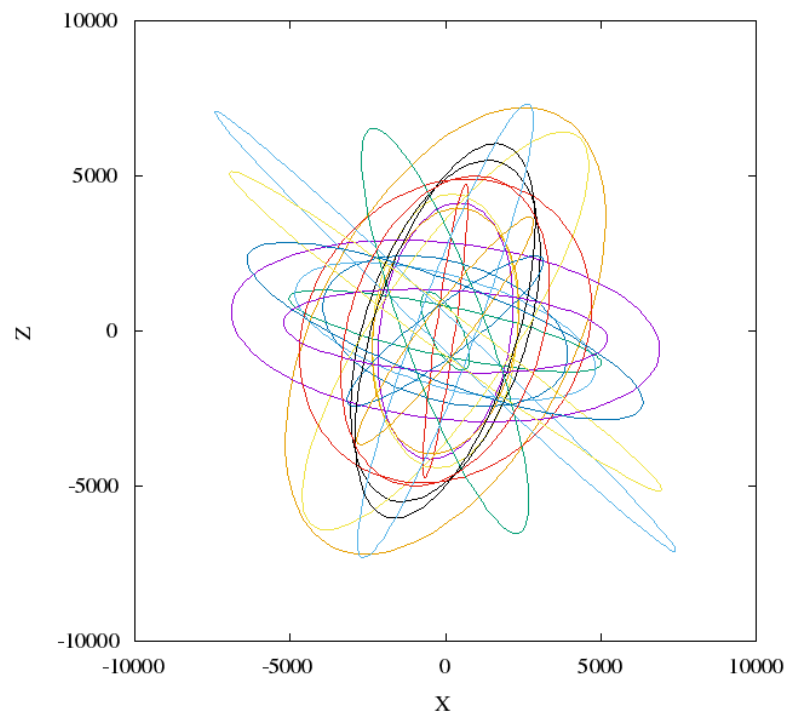


Рис. 6.8. Проекция орбит наноспутников на плоскость XZ СОСК

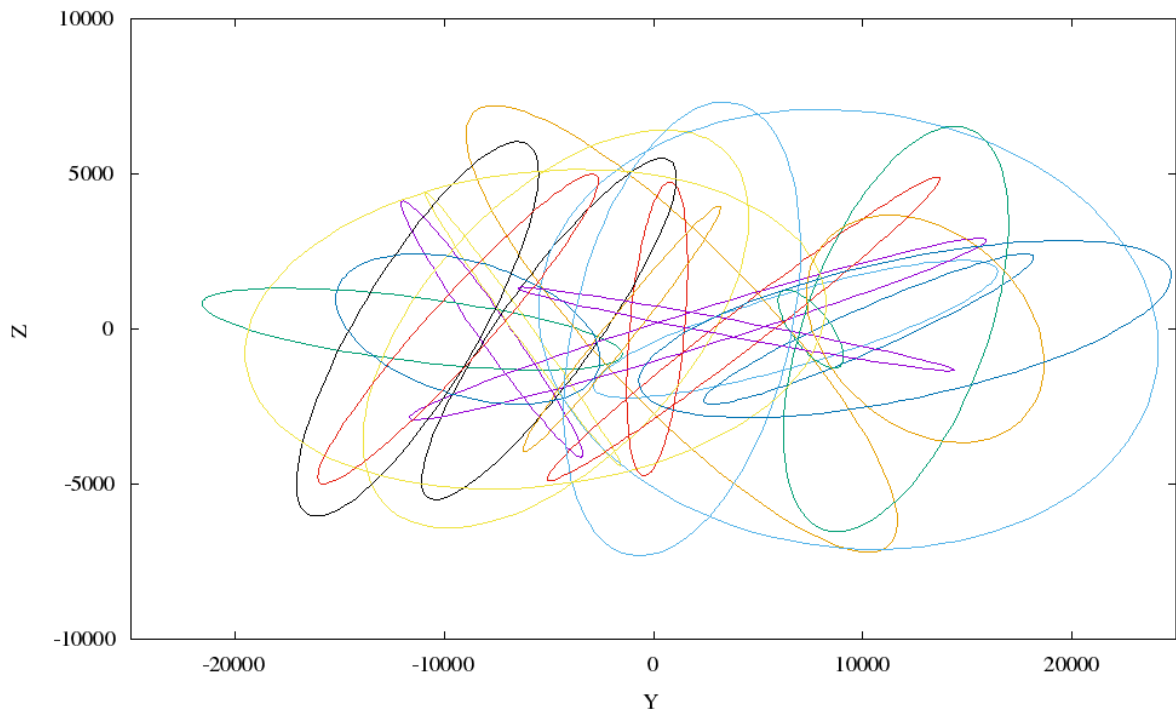


Рис. 6.9. Проекция орбит наноспутников на плоскость YZ СОСК

Орбиты лидера и спутников подвергаются возмущающим воздействиям, следствием чего является постепенное изменение их параметров, приводящее к нарушению компактности группировки. При отсутствии коррекции лидер со временем утрачивает возможность осуществления связи как минимум с некоторыми своими спутниками, что снижает надёжность, см. рис. 6.10. Следовательно, при имитационном моделировании СКГН должны учитываться возмущающие и корректирующие воздействия, т. е. эти воздействия должны быть реализованы при адаптации представленного в главе 4 симулятора. Поэтому рассмотрим, каким возмущающим воздействиям подвергаются орбиты наноспутников группировки.

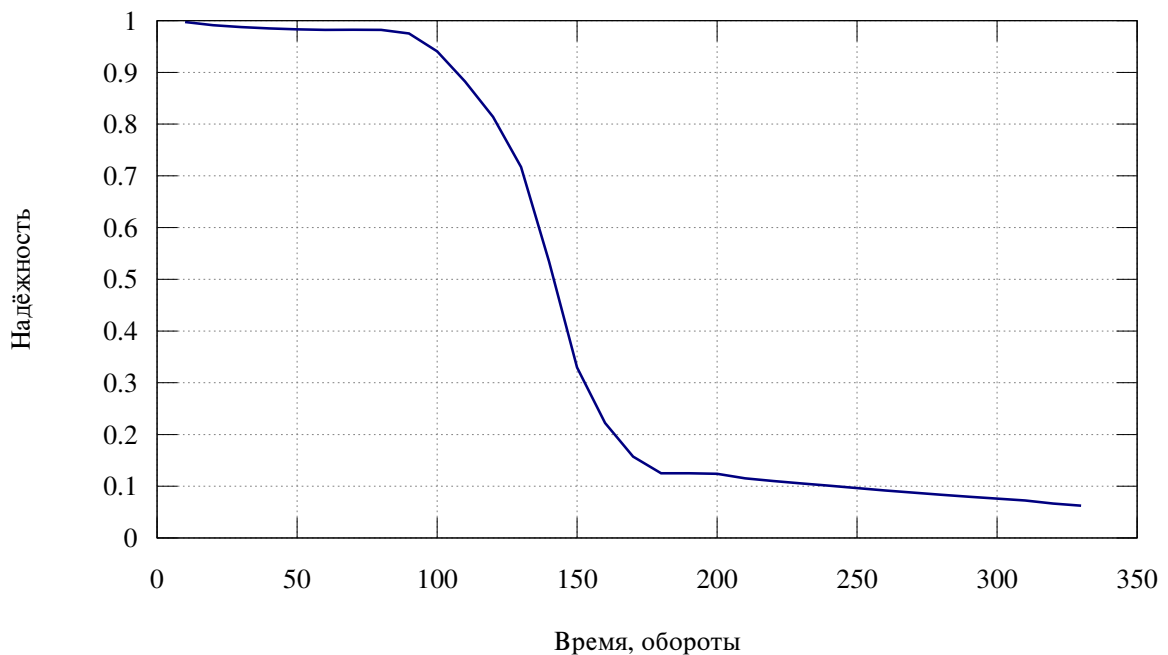


Рис. 6.10. Снижение надёжности подсистемы управления измерениями под влиянием возмущений орбиты (по результатам имитационного моделирования; исходные орбиты соответствуют данным табл. 6.4)

Возмущающие воздействия. При отсутствии управляющего воздействия возмущённое движение тела вокруг Земли описывается уравнением [136, 137]

$$\ddot{\mathbf{r}} + \frac{\mu \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} = \mathbf{j}_E + \mathbf{j}_M + \mathbf{j}_S + \mathbf{j}_a + \mathbf{j}_p, \quad (6.5)$$

где μ — произведение гравитационной постоянной и массы Земли, \mathbf{j}_E — возмущающее ускорение, вызванное отклонением силы тяжести Земли от идеальной, \mathbf{j}_a — возмущающее ускорение, вызванное сопротивлением воздуха, \mathbf{j}_M — возмущающее ускорение, вызванное притяжением Луны, \mathbf{j}_S — возмущающее ускорение, вызванное притяжением Солнца, \mathbf{j}_p — возмущающее ускорение, вызванное световым давлением. Проанализируем эти составляющие.

В учёте отклонения ΔU потенциала поля притяжения Земли от идеального ограничимся только второй зональной гармоникой, так как её величина на три порядка больше остальных [138, 137]. Тогда

$$\Delta U = -C_{2,0} \frac{\mu R_E^2}{2r^3} (3 \sin^2 \varphi - 1), \quad (6.6)$$

где $C_{2,0} = 1.0826257 \cdot 10^{-3}$ — вторая зональная гармоника разложения в ряд потенциала поля притяжения Земли по сферическим функциям, $R_E = 6378137$ м — экваториальный радиус Земли, φ — широта. Учитывая, что $\sin \varphi = \frac{z}{r}$, $\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}$,

$\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{y}{r}$, $\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{z}{r}$ дифференцированием находим возмущающее ускорение:

$$\mathbf{j}_E = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} C_{2,0} \frac{\mu R_E^2}{r^5} \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) x \\ -\frac{3}{2} C_{2,0} \frac{\mu R_E^2}{r^5} \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) y \\ -\frac{3}{2} C_{2,0} \frac{\mu R_E^2}{r^5} \left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) z \end{pmatrix}. \quad (6.7)$$

Луна и Солнце оказывают существенное влияние на спутники, если высота орбиты более 15000 км [137]. В нашем случае это не так, поэтому

$$\mathbf{j}_M = 0, \quad \mathbf{j}_S = 0. \quad (6.8)$$

Аэродинамическое торможение характеризуется выражением

$$\mathbf{j}_a = -C \frac{\rho v_a^2}{2m} S \mathbf{v}_a^1, \quad (6.9)$$

где C — безразмерный коэффициент, S — площадь проекции поперечного сечения наноспутника на плоскость, перпендикулярную направлению движения, m — масса наноспутника, ρ — плотность атмосферы на высоте орбиты, v_a — скорость наноспутника относительно атмосферы, \mathbf{v}_a^1 — единичный вектор скорости относительно атмосферы. При моделировании приняты следующие значения. В связи с тем, что длина свободного пробега молекул составляющих воздух газов значительно превосходит размеры наноспутника, принято значение $C=2$ [139]. Для высоты орбиты наноспутников 400 км принято значение плотности атмосферы $\rho=2.04 \cdot 10^{-12}$ кг/м³. Площадь проекции наноспутника принята $S=0.01$ м².

Давление солнечного света вызывает ускорение [140]

$$\mathbf{j}_p = -C_R \frac{S_R}{m} q_r \left(\frac{r_\odot}{\Delta} \right)^2 \Delta, \quad (6.10)$$

где C_R — коэффициент, зависящий от свойств поверхности наноспутника, S_R — площадь поперечного сечения аппарата в проекции на плоскость, перпендикулярную направлению на Солнце, $q_r=4.56 \cdot 10^{-6}$ Н/м² — световое давление на околоземной орбите, $r_\odot=1.4959787061 \cdot 10^{11}$ м — расстояние от Земли до Солнца, Δ — единичный вектор в направлении от наноспутника к Солнцу, Δ — расстояние от наноспутника до Солнца.

Таким образом, возмущённое движение наноспутника в отсутствие управляющего воздействия определяется выражениями (6.5), (6.7)-(6.10). При построении графика снижения надёжности на рис. 6.10 учтены возмущающие воздействия отклонения силы тяжести Земли от идеальной, влияния атмосферы, давления солнечного света. Эти возмущения вносят заметный вклад в нарушение компактности группировки. Поэтому они должны быть учтены при имитационном моделировании движения составляющих группировку наноспутников.

Обеспечение компактности группировки наноспутников. Во избежание нарушения компактности группировки движение составляющих её наноспутников периодически корректируется. В составе лидера ДУ отсутствует, он не имеет возможности корректировать свою орбиту. Поэтому орбита лидера считается эталонной для спутников. Целью коррекции орбит спутников является поддержание исходного (заданного в табл. 6.4) соотношения между орбитами спутника и лидера. Для обеспечения возможности коррекции орбиты спутников в сообщении с сетевой информацией лидер включает своё состояние (6.2), дополняя приведённый в выражении (3.29) перечень сетевой информации:

$$\Gamma = (\hat{A}, T, \hat{t}^S, \hat{t}^{AFP}, \hat{k}, \hat{q}, \mathbf{x}_0). \quad (6.11)$$

Определение параметров орбиты. Параметры орбиты a , e , i , Ω , ω , M определяются исходя из векторов координат \mathbf{r} и скорости \mathbf{v} , полученных от приёмника ГЛОНАСС, при помощи известных соотношений [137-139]. Обозначим вектор параметров орбиты \mathbf{q} , функцию перехода от \mathbf{x} к \mathbf{q} как χ . Функцию обратного перехода обозначим χ^{-1} :

$$\mathbf{q} = \chi(\mathbf{x}), \quad (6.12)$$

$$\mathbf{x} = \chi^{-1}(\mathbf{q}). \quad (6.13)$$

Периодически получая сообщения с сетевой информацией, содержащие параметры орбиты лидера \mathbf{q}_0 , и определяя параметры собственной орбиты \mathbf{q} , в соответствии с (6.3) спутник вычисляет своё текущее положение $\bar{\mathbf{x}}$ в СОСК:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{M}(\chi^{-1}(\mathbf{q}) - \chi^{-1}(\mathbf{q}_0)). \quad (6.14)$$

При выходе положения наноспутника из допустимого диапазона, границы которого определяются данными из табл. 6.4, он корректирует свою орбиту, затрачивая на коррекцию некоторую часть запаса рабочего тела.

Расход рабочего тела. Массовый расход $\dot{m}(t)$ рабочего тела реактивного двигателя определяется выражением

$$\dot{m}(t) = \frac{F(t)}{g I_y}, \quad (6.15)$$

где $F(t)$ — тяга двигателя, g — ускорение свободного падения на поверхности Земли, I_y — удельный импульс двигателя, выраженный в единицах времени. Суммарный расход $m(t_k)$ рабочего тела к моменту времени t_k определяется выражением

$$m(t_k) = \int_0^{t_k} \dot{m}(t) dt = \frac{1}{g I_y} \int_0^{t_k} F(t) dt . \quad (6.16)$$

Следовательно, успешная коррекция орбиты спутника в момент времени t_k возможна при выполнении условия

$$m(t_k) < m_{\text{макс}} - m_{\text{корр}} , \quad (6.17)$$

где $m_{\text{макс}}$ — запас рабочего тела на борту спутника, $m_{\text{корр}}$ — масса рабочего тела, необходимая для выполнения текущей коррекции.

После исчерпания запаса рабочего тела спутник утрачивает возможность корректировать свою орбиту и через некоторое время покидает пределы группировки. Таким образом, срок функционирования группировки в компактном виде ограничен начальной величиной запаса рабочего тела ДУ спутников. Этот срок может быть продлён с помощью экономного расходования рабочего тела, обеспечиваемого оптимальной коррекцией орбит спутников с соответствующей критериальной функцией.

При проектировании СКГН коррекции орбиты должны быть учтены, так как в противном случае моделирование возмущений орбиты приведёт к нарушению компактности группировки и, следовательно, связности беспроводной сети. Рассмотрим одну из возможных моделей коррекции орбит наноспутников.

Опорная орбита спутника определяется исходя из параметров его исходной орбиты и изменения параметров орбиты лидера. Для обеспечения этой процедуры после выведения на исходную орбиту спутник запоминает параметры $\mathbf{q}_0(0)$ исходной орбиты лидера и параметры $\mathbf{q}(0)$ своей исходной орбиты. Получив сообщение синхронизации, содержащее текущие координаты и скорость $\mathbf{x}_0(t)$ лидера, спутник при помощи (6.12) определяет текущие параметры $\mathbf{q}_0(t)$

его орбиты, используя их для определения величины изменения параметров его орбиты:

$$\Delta \mathbf{q}_0(t) = \mathbf{q}_0(t) - \mathbf{q}_0(0). \quad (6.18)$$

Для поддержания компактности группировки орбиты спутников должны изменяться согласовано с орбитой лидера:

$$\mathbf{q}^*(t) = \mathbf{q}(0) + \Delta \mathbf{q}_0(t). \quad (6.19)$$

Результаты имитационного моделирования показывают, что эксцентриситет орбиты лидера возрастает, поэтому выражение (6.19) применимо ко всем элементам орбиты, включая эксцентриситет. Параметры текущей орбиты спутника должны быть скорректированы на величину

$$\Delta \mathbf{q}(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}^*(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}(0) - \Delta \mathbf{q}_0(t). \quad (6.20)$$

Коррекция орбиты. Задача коррекции орбиты наноспутника, исходными данными которой являются параметры начальной и конечной орбит, аналогична задаче стыковки с нулевыми отклонениями координат и скорости стыкующегося аппарата относительно цели в конце траектории. Движение наноспутника относительно цели в проекциях на оси орбитальной СК цели описывает следующая система [136, 141]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2\dot{y}\omega - \omega^2 \left(2\frac{r}{p} + 1 \right) x - \dot{\omega}y &= u_x \\ \ddot{y} + 2\dot{x}\omega + \omega^2 \left(\frac{r}{p} - 1 \right) y + \dot{\omega}x &= u_y, \\ \ddot{z} + \omega^2 \frac{r}{p} z &= u_z \end{aligned} \quad (6.21)$$

где x , y и z — координаты наноспутника в орбитальной СК цели, ω — угловая скорость цели, p — фокальный параметр орбиты цели, r — расстояние между центрами масс цели и Земли, u_x , u_y и u_z — проекции ускорения управляемого аппарата. Можно переписать (6.21) в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (6.22)$$

где $\mathbf{x} = (x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$,

$$\mathbf{A}(t) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega^2 \left(2 \frac{r}{p} + 1 \right) & \dot{\omega} & 0 & 0 & 2\omega & 0 \\ -\dot{\omega} & -\omega^2 \left(\frac{r}{p} - 1 \right) & 0 & -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^2 \frac{r}{p} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Зависимость элементов матрицы \mathbf{A} от времени проявляется через угловую скорость и угловое ускорение цели, непостоянные для эллиптической орбиты.

Требуется найти управление $\mathbf{u}^*(t)$, обеспечивающее перевод наноспутника из начального состояния $\mathbf{x}(0)$ в конечное состояние $\mathbf{x}(T) \approx 0$ с минимальным расходом рабочего тела ДУ при ограничении на управляющее ускорение.

Для поиска управления будем минимизировать критерий качества в виде суммы квадратичной формы от вектора конечного состояния и интеграла от квадратичной формы вектора управления [142, 137]

$$J = \mathbf{x}^T(T) \hat{\mathbf{S}} \mathbf{x}(T) + \alpha \int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{W} \mathbf{u} dt, \quad (6.23)$$

где α — множитель Лагранжа, а значения матриц $\hat{\mathbf{S}}$ и \mathbf{W} обеспечивают выполнение требований к конечному состоянию и управлению соответственно. Матрица $\hat{\mathbf{S}}$ может быть выбрана в виде

$$\hat{\mathbf{S}} = \begin{vmatrix} x_{\max}^{-2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{\max}^{-2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_{\max}^{-2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{x}_{\max}^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{y}_{\max}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{z}_{\max}^{-2} \end{vmatrix}, \quad (6.24)$$

где x_{\max} , y_{\max} , z_{\max} , \dot{x}_{\max} , \dot{y}_{\max} , \dot{z}_{\max} — предельно допустимые значения отклонений. Матрица \mathbf{W} может быть выбрана как

$$\mathbf{W} = \begin{vmatrix} (u_{\max}^2 T)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (u_{\max}^2 T)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (u_{\max}^2 T)^{-1} \end{vmatrix}, \quad (6.25)$$

где u_{\max} — абсолютная величина предельно допустимого ускорения.

Используя для нахождения минимизирующего критерий (6.23) управления метод прогонки [143, 142], получаем матричное уравнение Рикатти

$$\dot{\mathbf{S}} = -\mathbf{S}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{S} + \alpha^{-1} \mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} \quad (6.26)$$

с граничным условием

$$\mathbf{S}(T) = \hat{\mathbf{S}}. \quad (6.27)$$

Проинтегрировав (6.26) от $t=T$ до $t=0$, найдём $\mathbf{S}(0)$. Искомое оптимальное управление имеет вид [142, 137]

$$\mathbf{u}^*(t) = -\frac{1}{\alpha} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S}(t) \mathbf{x}^*(t) \quad (6.28)$$

и определяется на основе результатов совместного интегрирования (6.22) и (6.26) от $t=0$ до $t=T$.

В качестве продолжительности T коррекции используется период обращения наноспутника. Множитель Лагранжа α в (6.23) подбирается [137] так, чтобы выполнялось требование

$$\mathbf{x}^T(T) \hat{\mathbf{S}} \mathbf{x}(T) \leq 1. \quad (6.29)$$

Пример найденного таким образом оптимального управления показан на рис. 6.11.

Информация о положении наноспутников. Для обеспечения возможности соотнесения при обработке в НКП результатов измерений с положением конкретного наноспутника в сообщении с результатами измерений должно быть добавлено его положение. Однако добавление характеристики положения существенно (на 24 байта) увеличивает размер каждого сообщения, что нежелательно. Поэтому применяется следующий подход.

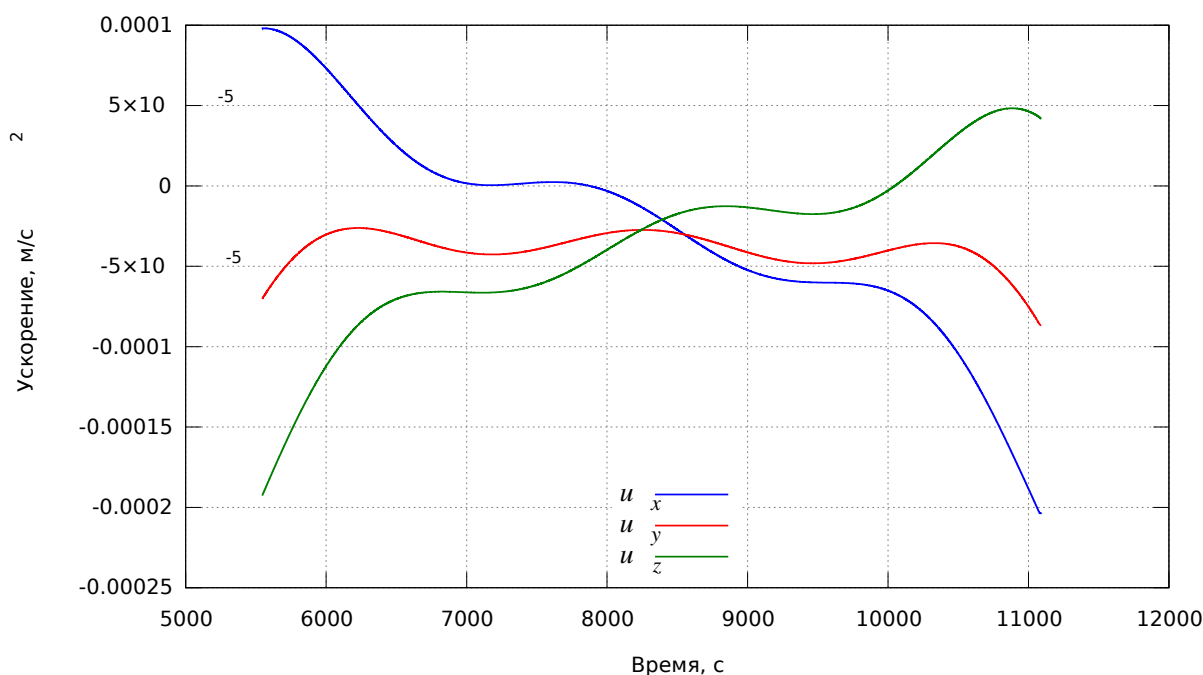


Рис. 6.11. Пример оптимального управления

В каждое сообщение добавляется только величина, характеризующая положение наноспутника на его орбите — средняя аномалия M . Изменения орбит наноспутников, обусловленные возмущающими ускорениями (6.7)-(6.10), относительно медленны, поэтому полный набор параметров орбиты $\mathbf{q}=(a, e, \Omega, i, \omega, M)$ передается только один раз на витке. Во избежание существенного возрастания трафика при одновременной передаче спутниками параметров своих орбит каждый из наноспутников выбирает время для передачи этих параметров случайным образом, независимым от выбора других аппаратов группировки. Получив от некоторого спутника набор параметров орбиты \mathbf{q} ,

лидер сохраняет его. В дальнейшем, получив результаты измерений от этого спутника, лидер в рамках предварительной обработки дополняет среднюю аномалию, сопровождающую принятые данные, другими параметрами орбиты q . При получении нового набора параметров орбиты ранее сохранённый набор заменяется. Добавление M к результатам измерения увеличивает их размер с 22 байт до 30, см. табл. 6.1 и 6.3.

6.4.3. Выбор типа ИП узлов

В основу системы электропитания наноспутников положена схема, показанная на рис. 5.3. Однако, учитывая низкое напряжение на выходе ФЭП, в эту схему добавлен преобразователь величины постоянного напряжения. Модифицированная схема показана на рис. 6.12.

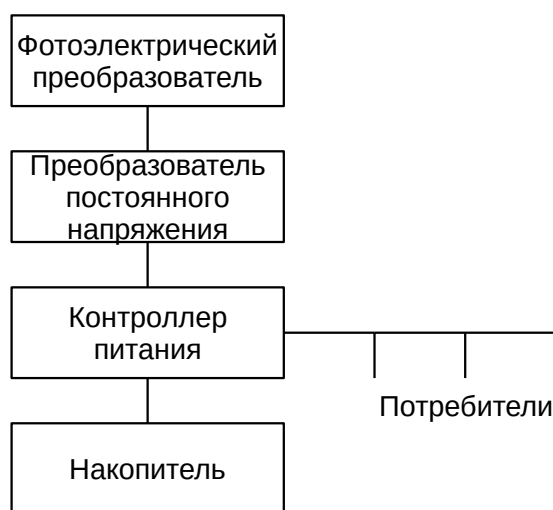


Рис. 6.12. Схема системы электропитания наноспутников

ФЭП преобразует энергию солнечного света в электрическую. Выработанная во время облучения ФЭП солнечным светом энергия запасается для будущего использования. Низкое напряжение на выходе ФЭП повышается до необходимого для заряда накопителя (аккумулятора или ионистора) значения преобразователем постоянного напряжения. Некоторая часть выработанной энергии может сразу отбираться потребителями. При нахождении в тени Земли

ФЭП электрической энергии не вырабатывает, и питание потребителей осуществляется запасённой энергией.

По такой схеме (ФЭП с накопителем энергии) построены системы электропитания 85% наноспутников формата Cubesat [144].

Таким образом, источниками питания для всех наноспутников группировки являются автономные возобновляемые за счёт энергии солнечного света ИП.

6.4.4. Адаптация симулятора БСС для космических систем для моделирования СКГН

Имитационное моделирование СКГН выполняется в соответствии с порядком, изложенным в разделе 5.5. Перед выполнением моделирования представленный в четвёртой главе симулятор был адаптирован для обеспечения моделирования возмущённого движения наноспутников, проведения коррекций орбиты спутников, передачи параметров текущей орбиты спутников q на случайном периоде витка и учёта расхода рабочего тела.

Симулятор СКГН строится с учётом следующих обстоятельств. Первое — согласно постановке задачи в разделе 6.2 положение наноспутников относится к исходным данным симулятора. Второе — итерационный характер методики проектирования (см. рис. 5.1) предусматривает многократное моделирование работы БСС при неизменных траекториях её узлов. Поэтому для ускорения моделирования оно должно быть разделено на два этапа: 1) определение положения наноспутников для каждой активной фазы и 2) симуляция работы БСС. При этом в начале каждой активной фазы положение узлов БСС задаётся в соответствии с ранее определённым на первом этапе. Информация о положении узлов передаётся между исполняемыми файлами обоих этапов через внешний файл, см. рис. 6.13. За однократным исполнением первого этапа следует многократное исполнение второго этапа.

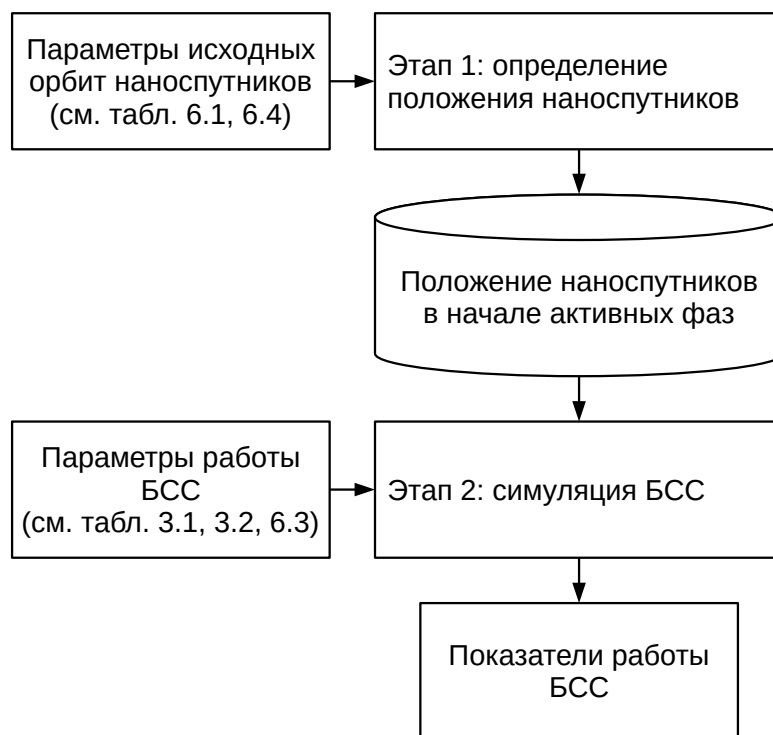


Рис. 6.13. Два этапа моделирования СКГН

Этап 1: определение положения наноспутников. Для моделирования возмущённого движения наноспутников разработан класс *Satellit*. Этот класс обеспечивает преобразование координат и скорости наноспутника из ГЭСК в связанную с лидером орбитальную (см. рис. 6.6) и обратно, преобразование координат и скорости в параметры орбиты и обратно, численное интегрирование уравнений возмущённого движения, расчёт и реализацию коррекций, учёт расхода рабочего тела в соответствии с (6.16), хранение специфических данных наноспутника (масса и т. д.) и доступ к ним.

В начальный момент времени все наноспутники группировки размещаются в соответствии с условиями их выведения, приведёнными в табл. 6.4. В начале каждой активной фазы, будь то АФС или АФР, происходит сохранение координат и скорости каждого наноспутника во внешний файл. Момент начала АФС известен точно, момент начала АФР для наноспутников группировки зависит от их положения в структуре взаимодействия. Однако сочетание

- малости различий между началом АФР различных наноспутников группировки — до нескольких десятков миллисекунд,
- невысокой скорости относительного перемещения наноспутников — до 25 м/с,
- краткости активных фаз — до 100 мс

обеспечивает изменение относительного положения наноспутников за время АФР менее 10 м. Поэтому использование положения наноспутников, определённого на единый для всех наноспутников момент начала АФР, оправдано.

Этап 2: симуляция БСС. Основу симулятора БСС, реализующего второй этап симуляции СКГН, составляет представленный в главе 4 симулятор. В нём произведены незначительные изменения: обеспечена возможность получения из внешнего файла не только начальных координат узлов БСС, реализованная параметром `--file` (см. табл. 4.1), но и их новых значений для каждой активной фазы.

В соответствии с (6.4) в качестве модели потерь при распространении радиоволн использовано выражение (3.43).

Целью имитационного моделирования является выбор значений параметров функционирования БСС, обеспечивающих минимальный средний расход энергии её узлами при ограничении снизу на надёжность СКГН. Правомерность использования не фактического, а именно среднего расхода энергии узлами обосновывается следующими соображениями.

Расход энергии различными узлами может быть как ниже, так и выше среднего. Однако расход энергии выше среднего по сети характерен для узлов, расположенных ближе к шлюзу, так как им приходится помимо передачи собственных результатов измерений ретранслировать и сообщения других узлов, что удлиняет их активные фазы. В БСС группировки наноспутников функции шлюза выполняет лидер. Следовательно, расход энергии выше среднего характерен для наноспутников, расположенных в пространстве ближе к лидеру. И наоборот — более низкий расход энергии характерен для узлов, расположенных

на периферии беспроводной сети (см. рис. 5.8 и 5.9), которым раньше других понадобится энергия их ИП для коррекции орбиты. Поэтому использование ограничения на средний расход энергии узлов БСС правомерно.

6.4.5. Выбор рациональных значений и интервалов исследования параметров работы БСС

Рассмотрим выбор начальных¹⁰ диапазонов, в которых далее будем определять рациональные значения параметров работы БСС для космических систем в соответствии с методикой, представленной в разделе 5.4. С целью снижения размерности некоторые параметры работы фиксируются на основе априорной информации о задаче.

Максимальный интервал ожидания альтернативных предложений. Так как проектируемая БСС должна обслуживать лишь 24 узла и учитывая вид графика на рис. 5.4 выберем в качестве максимального интервала ожидания альтернативных предложений ϕ_1 значение 2 мс и дополнительного исследования проводить не будем.

Количество хранимых на узле пар последних успешно обработанных сообщений. Вследствие небольшого количества узлов в сети выберем $\phi_2=4$ и соответствующего исследования проводить не будем, так как $2^4=16$ адресов занимают в памяти всего 128 байт.

Параметры комбинации СЗР и настойчивости. Параметры СЗР и настойчивости для СКГН будем определять статическим способом на основании результатов имитационного моделирования. Количество попыток повторной отправки ϕ_4 — две (без проведения дополнительного исследования), величина СЗР ϕ_3 — от 5 до 45 мс. Шаг изменения ϕ_3 — 10 мс.

10 Начальные границы диапазона исследования могут не совпасть с окончательными. Если результаты исследования показывают, что по мере приближения к границе диапазона значение одного показателя работы улучшается и при этом не происходит ухудшения значения другого показателя, то граница диапазона должна быть расширена.

Интервал буферизации. Учитывая небольшое число узлов сети и вид графика на рис. 5.7, в качестве значения интервала буферизации ϕ_5 выберем 7.5 мс.

Зависимость между качеством связи с родителем и предельным размером буфера. Учитывая небольшое число узлов сети, будем использовать первую строку табл. 5.1 без проведения дополнительного исследования. Размер одного измерения в БСС группировки составляет 30 байт (см. раздел 6.4.2). Это значит, что размер буфера измерений кратен 30 байтам. Поэтому первая строка табл. 5.1 может быть сокращена до трёх столбцов.

Защитный интервал АФС и АФР. Учитывая небольшое количество узлов в сети, выберем $\phi_7 = 1$ мс и дополнительных исследований проводить не будем.

Продолжительность ожидания сообщения синхронизации. Учитывая небольшое количество узлов в сети, для этого параметра выберем значение $\phi_8 = 0.9$ с и дополнительных исследований проводить не будем.

Начальная длительность и квант продления АФР. В качестве исходного для проведения исследований выберем диапазон начальной длительности ϕ_9 от 40 до 90 мс, для кванта продления ϕ_{10} — от 10 до 35 мс. Шаг изменения ϕ_9 — 10 мс, ϕ_{10} — 5 мс.

Смещение АФР родителя относительно потомка. Учитывая перечисленные в разделе 5.4.9 связи между значением смещения АФР родителя относительно потомка с другими параметрами, для параметра ϕ_{11} установим диапазон исследования от 25 до 50 мс. Нарушение условия (5.7) выбора значения ϕ_{11} при некоторых сочетаниях значений ϕ_3 , ϕ_5 и ϕ_9 приводит к увеличению времени на имитационное моделирование, но не к получению неверных значений показателей работы СКГН, и поэтому допустимо. Шаг изменения ϕ_{11} — 5 мс.

Параметры выбора смещения АФР шлюза. Учитывая небольшое количество узлов сети, большое расстояние связи между узлами и относительно невысокую скорость взаимного перемещения наноспутников, выберем следующие

значения параметров смещения АФР шлюза: $\phi_{12}=4$, $\phi_{13}=50$ мс и дополнительных исследований проводить не будем.

Таким образом, исследованию влияния на показатели работы подсистемы управления измерениями подлежат параметры ϕ_3 , ϕ_9 , ϕ_{10} и ϕ_{11} , а значения параметров ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_4 , ϕ_5 , ϕ_6 , ϕ_7 , ϕ_8 , ϕ_{12} и ϕ_{13} определены исходя из имеющейся информации о задаче.

6.5. Результаты проектирования СКГН

Диапазоны и шаг изменения выбранных для исследования параметров определяют количество прогонов имитационной модели, различающихся значениями параметров. Оно составляет 1080. Было выполнено имитационное моделирование подсистемы управления измерениями для всех 1080 комбинаций параметров ϕ_3 , ϕ_9 , ϕ_{10} и ϕ_{11} . Из полученных результатов были отброшены те, что не удовлетворяют требованию по надёжности (см. табл. 6.1). В множестве оставшихся результатов найдены эффективные по Парето, см. рис. 6.14. Наименьший средний расход энергии при выполнении ограничения на надёжность обеспечивает следующее сочетание параметров работы БСС: $\phi_3=15$ мс, $\phi_9=70$ мс, $\phi_{10}=20$ мс, $\phi_{11}=35$ мс. Это сочетание обеспечивает надёжность 0.908 при среднем расходе энергии 24.96 мДж.

Таким образом, в результате проектирования определены значения параметров СКГН, обеспечивающие надёжность не хуже требуемой при минимальном среднем расходе энергии узлами.

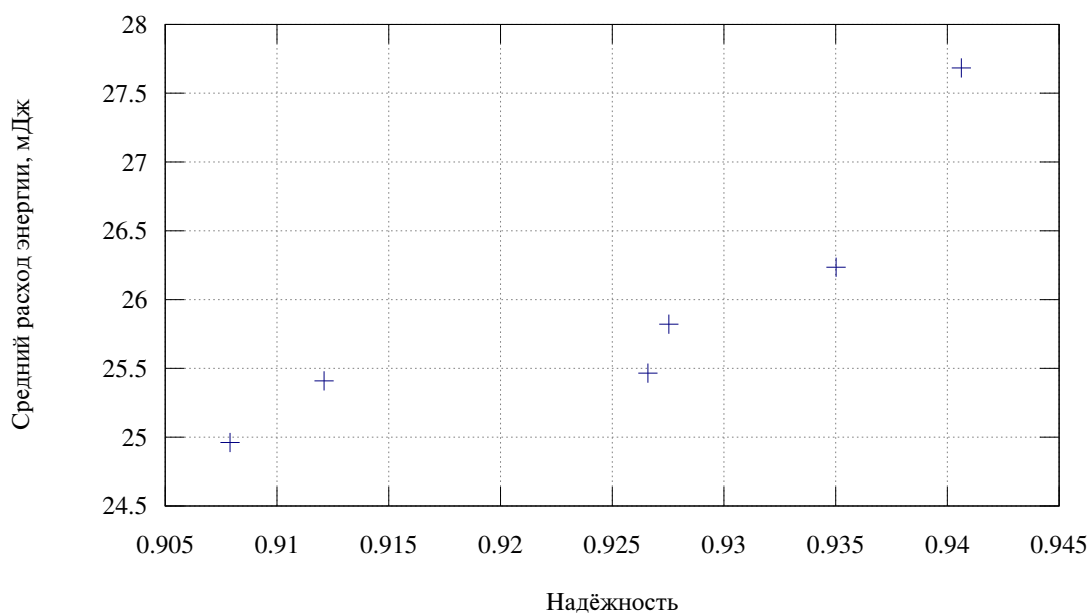


Рис. 6.14. Эффективные по Парето результаты

6.6. Сопоставление эффективности СКГН на основе БСС для космических систем с существующими альтернативами

Сравним потребление энергии СКГН на основе БСС для космических систем с СКГН, использующими в своей работе альтернативные основы для коммуникаций. В качестве альтернативных основ рассмотрим перечисленные в отчёте NASA «State-of-the-Art Small Spacecraft Technology» [144] радиомодемы, удовлетворяющие всем следующим условиям:

- 1) мощность передатчика радиомодема не превышает 24 дБм·Вт ($\approx 0,25$ Вт);
- 2) масса радиомодема не превышает 0,5 кг;
- 3) радиомодем не использует наземную или орбитальную инфраструктуру;
- 4) приёмный и передающий узлы используют один и тот же радиомодем.

Найдём потребление энергии выбранными радиомодемами за один период работы, полагая, что каждый из них может работать без потерь данных в дискретном режиме с параметрами, определёнными для СКГН на основе БСС. Результаты представлены в табл. 6.5.

Потребление энергии СКГН на основе существующих радиомоделей

Производитель	Модель	Потребление энергии, мДж
NI Ettus Research	B205mini [145]	130
Microhard	Nano N2420 [146]	40
AstroDev	Lithium-1 [147]	1050

Сопоставление данных табл. 6.5 с результатами предыдущего раздела показывает, что затраты энергии СКГН на основе БСС на 37,5% ниже, чем у ближайшей альтернативы. Это подтверждает эффективность применения БСС для космических систем при организации коммуникаций внутри группировки наноспутников.

В шестой главе работы представлено решение задачи проектирования системы коммуникаций внутри группировки наноспутников, исследующих задержки распространения навигационных сигналов при их прохождении через ионосферу, при помощи результатов, полученных в предыдущих главах работы:

- класса БСС для космических систем (глава 2),
- модели БСС для космических систем (глава 3),
- симулятора БСС для космических систем (глава 4),
- методики проектирования БСС для космических систем (глава 5).

Сопоставление затрат энергии СКГН на основе БСС для космических систем и СКГН на основе применяемых в настоящее время на наноспутниках радиомоделей показывает, что применение СКГН на основе БСС для космических систем на 37,5% энергетически выгоднее, что подтверждает тезис об эффективности использования разработанного класса БСС для организации коммуникаций в космических системах.

Заключение

Основным результатом проведённого исследования является достижение поставленной цели — создание специального класса БСС для космических систем, расширяющего их возможности за счёт снижения затрат энергии при решении задач коммуникаций в компактных группировках космических аппаратов и задач мониторинга как на борту космического аппарата, так и в наземном сегменте космических систем. При достижении поставленной цели были получены следующие обладающие научной новизной результаты.

1. На примерах использования БСС в наземном и космическом сегментах продемонстрирована целесообразность применения БСС в космических системах. Показано, что критическими показателями работы БСС в космических системах являются надёжность и расход энергии (при использовании автономных невозобновляемых источников питания — долговечность). На основании системного анализа собственных особенностей БСС и влияющих на БСС особенностей космических систем научно обоснована необходимость разработки класса БСС для космических систем, приоритетом для которых является обеспечение заданного уровня надёжности при одновременном снижении расхода энергии.

2. Сформулированы новые теоретические положения класса БСС для космических систем.

Основное положение предусматривает наличие в дискретном режиме БСС для космических систем двух активных фаз. Показано, что величина расхода энергии дискретной БСС определяется параметрами дискретного режима. Существенным недостатком дискретных БСС с одной активной фазой является простой узлов сети, вызванный неравномерным поступлением сообщений на активной фазе. Этот простой приводит к непроизводительному расходу энергии узлов БСС. Для исключения простоя узлов предложено в цикле работы узлов заменить его дополнительной фазой сна с многократно сниженным потреблением

энергии. Таким образом, активных фаз становится две. Первую активную фазу предложено использовать для распространения сетевой информации и построения структуры взаимодействия сети. Вторую активную фазу предложено использовать для передачи результатов измерений.

Другими положениями класса БСС для космических систем являются адаптивное определение времени начала и продолжительности активных фаз, обновление адреса родителя при построении структуры взаимодействия, дополнение сетевого уровня стека протоколов БСС функцией предотвращения передачи дубликатов, случайная задержка передачи результатов измерений, буферизация результатов измерений, управляемая качеством связи.

Значимость класса БСС для космических систем заключается в том, что он обеспечивает дополнительные возможности снижения расхода энергии и повышения надёжности по сравнению с универсальными БСС.

3. В обеспечение проектирования БСС для космических систем, удовлетворяющих заданным требованиям, разработано модельно-алгоритмическое обеспечение, связывающее топологические и функциональные параметры БСС с демонстрируемыми ею значениями показателей работы.

Модельно-алгоритмическое обеспечение включает в себя алгоритмы автономной работы узлов БСС (синхронизация, планирование работы узла, диспетчеризация, формирование пространственно-временной структуры взаимодействия, участие в сборе результатов) и модели их взаимодействия (доступ к радиоканалу в условиях конкуренции, приём сообщения в условиях воздействия помех, потери при распространении). Разработанные модели относятся к классу имитационных, основаны на дискретно-событийном и агентном подходах.

Значимость модельно-алгоритмического обеспечения заключается в том, что оно, дополняя новые теоретические положения наследуемыми, создаёт полное и законченное описание класса БСС для космических систем и является предпосылкой для создания инструмента анализа и синтеза таких БСС.

4. Разработан программно-методический комплекс проектирования БСС для космических систем, включающий в себя:

- программный симулятор БСС, результатами работы которого являются значения показателей работы и диагностическая информация, уточняющую причины их снижения;
- методику синтеза и анализа системы коммуникации и мониторинга на основе БСС для космических систем, состоящую из этапов подготовки модели обслуживаемого объекта, создания связной сети, выбора источников питания узлов, выбора значений функциональных параметров, имитационного моделирования и оценки качества полученных результатов.

Данный результат представляет существенную практическую значимость, так как позволяет при проектировании БСС для космических систем целенаправленно выбирать значения их топологических и функциональных параметров с целью удовлетворения заданных требований.

С использованием разработанного программно-методического комплекса подтверждена более высокая эффективность (более чем в два раза) БСС для космических систем по сравнению с дискретной БСС с одной активной фазой.

5. Полученные в работе теоретические и практические результаты были использованы для решения актуальной практической задачи проектирования системы коммуникации внутри группировки научных наноспутников. С использованием программно-методического комплекса проектирования БСС предложенного класса были выбраны аппаратные компоненты и значения функциональных параметров системы коммуникации.

Сопоставление величины расхода энергии на коммуникации показывает, что потребление энергии системой коммуникации на основе БСС для космических систем на 37,5% меньше, чем у ближайшего конкурента.

Таким образом подтверждён тезис об эффективности использования БСС для космических систем при организации коммуникаций в космических системах.

Список сокращений и условных обозначений

АФР — активная фаза ретрансляции результатов измерений

АФС — активная фаза синхронизации

АЦП — аналогово-цифровой преобразователь

БСС — беспроводная сенсорная сеть

ГЭСК — геоцентрическая экваториальная система координат

ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли

ДУ — двигательная установка

ДЦЗ — дерево целей и задач

ЕТРИС — единая территориально-распределённая информационная система

ИНС — искусственная нейронная сеть

ИП — источник питания

КА — космический аппарат

КК — космический комплекс

КС — космическая система

КЭ — космический эксперимент

МКС — международная космическая станция

НКП — наземный командный пункт

НС — наноспутник

ОГ — орбитальная группировка

ПЭС — полное электронное содержание

РТ — радиотомография

СЗР — случайная задержка передачи результата измерения

СК — система координат

СКГН — система коммуникаций внутри группировки наноспутников

СОСК — связанная орбитальная система координат

ФЭП — фотоэлектрический преобразователь

ЦНА — целевая научная аппаратура

ACK — Acknowledgment (подтверждение)
CCA — Clear Channel Assessment
COST — Co-operative for Scientific and Technical research
COTS — Commercial Off-The-Shelf
CRA — Collision Resolution Algorithm
CSMA/CA — Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
CTS — Clear To Send (разрешение передачи)
FDTD — Finite-Difference Time-Domain
IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM — Industrial, Scientific and Medical
ITU — International Telecommunication Union
LOS — Line Of Sight
LQI — Link Quality Indicator
MAC — Medium Access Control (канальный подуровень стека протоколов)
MACA — Multiple Access with Collision Avoidance
MANET — Mobile Ad Hoc Network
MCPS — MAC common part sublayer
MLME — MAC sublayer management entity
NLOS — Non Line Of Sight
NWК — сетевой уровень стека протоколов
O-QPSK — offset quadrature phase-shift keying
PHY — физический уровень стека протоколов
RTS — Ready To Send (запрос передачи)
SFD — Start of Frame delimiter
SFSN — Self-Organizing Sensor Network
SINR — Signal to Interference plus Noise Ratio
S-MAC — Sensor MAC

Список литературы

1. Braginsky D., Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications - WSNA '02. ACM Press the 1st ACM international workshop. Atlanta, Georgia, USA. 2002.
2. Culler, D., Estrin, D., Srivastava M. Guest Editors' Introduction- Overview of Sensor Networks. Computer, Volume 37, issue 8, 2004.
3. Elson J., Estrin D. Time Synchronization for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium. IEEE Computer Society, 2001. p. 186.
4. Elson, J. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts / J. Elson, L. Girod, D. Estrin // Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002). — Boston, 2002.
5. Ye, W. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. / W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin // Proceedings of the IEEE Infocom. — New York, 2002. pp.1567-1576.
6. Christian Bettstetter, Carlos Gershenson (Eds.) Self-Organizing Systems. 5th International Workshop, IWSOS 2011 Karlsruhe, Germany, February 23-24, 2011, Proceedings.
7. Prehofer, C., Bettstetter, C. Self-organization in communication networks - principles and design paradigms. IEEE Communications Magazine. Volume 43. issue 7. 2005.
8. Falko Dressler. Self-Organization in Sensor and Actor Networks. Wiley, 2008.
9. Dressler F. A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks. Computer Communications. Vo. 31, issue 13. 2008. pp.3018-3029.
10. Dressler F., Neuner D. Energy-Efficient Monitoring of Distributed System Resources for Self-Organizing Sensor Networks. IEEE 2013 IEEE Topical

Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet). Austin, TX, USA. 2013. pp.145-147.

11. Elson, J. Wireless Sensor Networks: A New Regime for Time Synchronization / J. Elson, K. Römer // Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNetsI), — Princeton, 2002.
12. Römer, K. Time Synchronization in Ad Hoc Networks / K. Römer // Proceedings of ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing — Long Beach, 2001.
13. Römer, K., Blum, P. and Meier, L. Time Synchronization and Calibration in Wireless Sensor Networks, in Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures (ed I. Stojmenović), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 2005.
14. Marinescu D.C., Yu C., Marinescu G.M. Scale-free, self-organizing very large sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing. Vol. 70, issue 5, 2010. pp.612-622.
15. Marinescu D.C. Complex Systems and Clouds. A Self-Organization and Self-Management Perspective. Elsevier, 2017.
16. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. — М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
17. Khorov E., Lyakhov A., Krotov A., Guschin A. A survey on IEEE 802.11AH: an enabling networking technology for smart cities. Computer Communications, Vol. 58, 2015, pp. 53-69, DOI: 10.1016/j.comcom.2014.08.008
18. Ляхов, А.И. Анализ совместного использования проактивного и реактивного методов распространения сетевой информации в многошаговых беспроводных сетях. / А.И. Ляхов, П.О. Некрасов, Д.М. Островский, А.А. Сафонов, Е.М. Хоров // Информационные процессы. — 2012. — Т. 12, №3. — с.198-212.

19. Кучерявый, А.Е. Самоорганизующиеся сети. / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый — Спб: Изд-во «Типография Любавич», 2011. — 312 с.
20. Кучерявый, А.Е. Интернет вещей. / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2013. — № 1. — С. 21-24.
21. Somov A., Baranov A., Spirjakin D., Spirjakin A., Sleptsov V., Passerone R. Deployment and evaluation of a wireless sensor network for methane leak detection. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. V. 202. P. 217-225.
22. ГОСТ Р 53802-2010. СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ КОСМИЧЕСКИЕ. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2019.
23. 1U CubeSat Solar Panel X/Y [Электронный ресурс] / сайт EnduroSat — Режим доступа: <https://www.endurosat.com/cubesat-store/all-cubesat-modules/1u-solar-panel-x-y/>
24. SINGLE RESISTOJET THRUSTER [Электронный ресурс] / сайт Aurora Propulsion Technologies — Режим доступа: https://aurorapt.fi/2020site/wp-content/uploads/2020/08/AURORA_Single_Resistojet_Thruster_V3.pdf
25. ESA - CubeSat rendezvous and docking. [Электронный ресурс] / сайт ESA. — Режим доступа: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/08/CubeSat_rendezvous_and_docking
26. Макарова, С.М. Непрерывный круглосуточный медицинский контроль психофизиологического состояния и координат космонавтов с использованием беспроводной сенсорной сети. / С.М. Макарова, С.Н. Падалко, Л.Б. Строгонова, М.Н. Терентьев // Вестник Московского авиационного института. – Москва: МАИ, 2012. – Т.19. – № 2, с. 177-181.
27. Гинзбург, И.Б. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами. / И.Б. Гинзбург, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // Электросвязь. – 2017. – №9. – с. 60-66.

28. IEEE Standards 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). — IEEE Computer Society, 2006.
29. Гуревич, О.С. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту. [Электронный ресурс] / О.С. Гуревич, М.Г. Кессельман, А.С. Трофимов, В.И. Чернышов // Труды МАИ. – Выпуск №94. Режим доступа: https://trudymai.ru/upload/iblock/223/gurevich_kesselman_trofimov_chernyshov_rus.pdf?lang=ru&issue=94
30. Irizar A., Ruiz P. Future Challenges, roadmap for WSN and dissemination activities. Wireless Smart Distributed End System for Aircraft. [Электронный ресурс] 2014. Режим доступа: http://www.wildcraft-eu.org/docs/20140331_Future-Roadmap-Dissemination_D111.pdf
31. Об использовании радиоэлектронными средствами фиксированного беспроводного доступа гражданского назначения полосы радиочастот 2400-2483,5 МГц (с изменениями на 29 февраля 2016 года). [Электронный ресурс] / сайт Техноэксперт. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420313049>
32. CC2420. 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. [Электронный ресурс] / сайт Texas Instruments. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2420>
33. CC2520 DATASHEET. 2.4 GHZ IEEE 802.15.4/ZIGBEE® RF TRANSCEIVER. [Электронный ресурс] / сайт Texas Instruments. — Режим доступа: www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2520.pdf
34. Терентьев, М.Н. Обзор публикаций, посвящённых самоорганизации беспроводных сенсорных сетей [Электронный ресурс] / М.Н. Терентьев // Труды МАИ. — 2017. — №94. Режим доступа: http://mai.ru//upload/iblock/43d/terentev_rus.pdf

35. Кудряшов, С.В. Узкополосная дальнометрия в беспроводных сенсорных сетях / С.В. Кудряшов // 8-я межд. конф. «Авиация и космонавтика – 2009». Тезисы докладов.– М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – с. 211.
36. Гинзбург, И.Б. Возможности использования беспроводных сенсорных сетей для организации предиктивного обслуживания авиационной техники. / И.Б. Гинзбург, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Москва. Тезисы. – М: Типография "Логотип", 2019. – С. 128.
37. Hanachi H., Liu J., Kim I.Y., Mechefske C.K. Hybrid sequential fault estimation for multi-mode diagnosis of gas turbine engines. Mechanical Systems And Signal Processing. 2019, Vol. 115, pp. 265-268, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.05.054
38. Bin Yousuf W., Khan T., Ali T. Prognostic Algorithms for Flaw Growth Prediction in an Aircraft Wing. IEEE Transactions On Reliability. 2017, Vol. 66, issue 2, pp. 478-486, doi: 10.1109/TR.2017.2676722
39. Shang Gao, Xuewu Dai, Yu Hang, Yuyan Guo, Qian Ji. Airborne Wireless Sensor Networks for Airplane Monitoring System. Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing. Vol. 2018, Article ID 6025825, 18 p. Doi: 10.1155/2018/6025825
40. Pallavi Joshi, Ghanshyam Singh, Ajay Singh Raghuvanshi. Impact of Duty Cycle and Different Routing Protocols on the Energy Consumption of a Wireless Sensor Network. Int. Conf. on Communication and Signal Processing, July 28 - 30, 2020, India.
41. N.Kavitha, V.Srinivasa rao, B.Chandramohan. FUZZY BASED SCHEDULING AND LOAD BALANCING FOR ZONE ROUTING PROTOCOL (ZRP) IN MOBILE AD HOC NETWORKS. J. of Critical Reviews, Vol. 7, Iss. 4, 2020.
42. Rangaraj Jayavenkatesan, Anitha Mariappan. Energy effective routing optimisation using ACO-FDR PSO for improving MANET performance. Int. J. Environment and Sustainable Development, Vol. 18, No. 1, 2019.

43. J. Rangaraj, M. Anitha. Implementing Energy Optimization by a Novel Hybrid Technique for Performance Improvement in Mobile Ad Hoc Network. *Int. J. of Applied Engineering Research*, Vol. 12, N 22 (2017), pp. 12029-12035.
44. Zi-Tsan Chou, Yu-Hsiang Lin, Tsang-Ling Sheu. Asynchronous Power Management Protocols with Minimum Duty Cycle and Maximum Adaptiveness for Multi-Hop Ad Hoc Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*. Vol. 62, Iss. 7, 2013, pp. 3301-3314.
45. Karn P. MACA: a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*. London, Ontario, Canada, 1990. pp.134-140.
46. Ye W., Heidemann, J., Estrin, D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. Vol. 12, issue 3. 2004. pp.493-506.
47. Tijs van Dam, Koen Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '03*. ACM Press. Los Angeles, California, USA. 2003.
48. Raphael Rom, Moshe Sidi. *Multiple Access Protocols - Performance and Analysis*, Springer-Verlag, New York, 1990.
49. DS2411 Silicon Serial Number with VCC Input. [Электронный ресурс] / сайт Maxim Integrated. — Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS2411.pdf>
50. ZigBee Pro Specification. [Электронный ресурс] / сайт ZigBee Alliance. — Режим доступа: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>
51. Падалко, С.Н. Самоорганизация в древовидных персональных беспроводных сетях при наличии нескольких шлюзов / С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. — 2017. — № 1. — С. 75–85.

52. Падалко, С.Н. Автоматизированное проектирование адаптивных дискретных беспроводных сенсорных сетей для космических систем. / С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 128 с.
53. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz. Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, USA, 1999.
54. Atmel 8-bit Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash. [Электронный ресурс] / сайт Atmel. — Режим доступа: http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf
55. MSP430F5438A-EP Mixed Signal Microcontroller datasheet. [Электронный ресурс] / сайт Texas Instruments. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf>
56. Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15). Humidity and Temperature Sensor. [Электронный ресурс] / сайт Sensirion. — Режим доступа: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf
57. BAROMETER MODULE. [Электронный ресурс] / сайт LabKit. — Режим доступа: <http://labkit.ru/userfiles/file/documentation/Sensor/FOSP01A.pdf>
58. Терентьев, М.Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / М.Н. Терентьев // Вестник Московского авиационного института.— Москва: МАИ, 2009. — Т.16. — № 4, с. 79-84.
59. Альтшуллер, Г.Б. Кварцевые генераторы: Справ. пособие. / Г.Б. Альтшуллер, Н.Н. Елфимов, В.Г. Шакулин — М.: Радио и связь, 1984. — 232 с.
60. Падалко, С.Н. Метод самоорганизации дискретной беспроводной сети с двумя активными фазами. / С.Н. Падалко, О.Л. Смирнов, М.Н. Терентьев // Электросвязь. — 2017. — №9. — с. 54-60.
61. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций / Хемди А. Таха; 7-е издание.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. — 912 с: ил.

62. Таненбаум, Э. Современные операционные системы / Э. Таненбаум; 2-е издание.: Пер. с англ. — Спб.: Питер, 2002. — 1040 с.
63. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse, and M. Franceschetti. Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks. IEEE JSAC, 27(7):1029-1046, September 2009.
64. IEEE P802.15. Wireless Personal Area Networks. Coexistence analysis of IEEE Std 802.15.4 with other IEEE standards and proposed standards.
65. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. — пер. с англ. — М: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.
66. Долуханов, М.П. Распространение радиоволн. / М.П. Долуханов — М: «Связь», 1972. — 336 с.
67. Henry L. Bertoni. Radio Propagation for Modern Wireless Systems, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000.
68. Friis, H.T., A Note on a Simple Transmission Formula, Proceedings of the IRE , vol.34, no.5, pp.254,256, May 1946.
69. Sarkar T.K., Zhong Ji, Kyungjung Kim, Medouri A., Salazar-Palma M. A survey of various propagation models for mobile communication. Antennas and Propagation Newsletter, IEEE Professional Group, Vol. 45, issue 3. 2003. pp.51-82.
70. Sarkar Tapan K., Wicks Michael C., Salazar-Palma Magdalena B. A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication. Smart Antennas. 2003 John Wiley & Sons, Inc.
71. M.Hata. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. VT-29, NO. 3, AUGUST 1980.
72. D. Molkdar. Review on radio propagation into and within buildings. IEE PROCEEDINGS-H, Vol. 138, No. I , FEBRUARY 1991.

73. Howard H. Xia, Henry L. Bertoni, Leandro R. Maciel, Andrew Lindsay-Stewart, and Robert Rowe. Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 41, NO. 10, OCTOBER 1993.
74. Ji Hoon Yoo, Jae Hyoung Lee, Sung Ho Cho. A Propagation Model in 2.4GHz ISM Band Using IEEE 802.15.4 Systems. 2011 17th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC) 2nd – 5th October 2011, Sutera Harbour Resort, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia.
75. Y. Ji, R. Player. A 3-D Indoor Radio Propagation Model for WiFi and RFID. MobiWac'11, October 31–November 4, 2011, Miami, Florida, USA.
76. Yuvraj Singh. Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 59– No.11, December 2012.
77. J.S.C. Turner, L. M. Kamarudin, D.L. Ndzi, A. Harun, A. Zakaria, A.Y.M Shakaff, A.R.M. Saad, S.M. Mamduh. Modelling Indoor Propagation for WSN Deployment in Smart Building. 2014 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC DESIGN (ICED), pp. 398-402.
78. Teles de Sales Bezerra, José Anderson Rodrigues de Sousa, Saulo Aislan da Silva Eleutério. Accuracy of Propagation Models to Power Prediction in WSN ZigBee Applied in Outdoor Environment. 2015 Sixth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems (CASE)
79. Lin Cheng, James Casazza, James Grace, Fan Bai, Daniel D. Stancil. Channel Propagation Measurement and Modeling for Vehicular In-Cabin WiFi Networks. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, Vol: 64 Issue: 12 pp.: 5424-5435.
80. Bedeer E., Pugh J., Brown C., Yanikomeroğlu H. Measurement-Based Path Loss and Delay Spread Propagation Models in VHF/UHF Bands for IoT Communications. 86th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) Toronto, CANADA, SEP 24-27, 2017.

81. Ata O.W. An Extended-AMATA Indoor Propagation Model for GSM 900/1800 MHz and Wi-Fi 2.4 GHz Frequencies. WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS Vol: 92 Issue: 3 pp.: 993-1009, FEB 2017.
82. Tian Sun, Lingxiang Zheng, Ao Peng , Biyu Tang, Gang Ou. Building information aided Wi-Fi fingerprinting positioning system. Computers and Electrical Engineering, V. 71 (2018), pp. 558–568.
83. John S. Seybold. Introduction to RF Propagation. Wiley, 2005.
84. T. Okumura, E. Ohmori, K. Fukuda, “Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service,” Review Electrical Communication Laboratory, 16, 9-10, 1968, pp. 825-873.
85. Recommendation ITU-R P.1411-6. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz.
86. J. Walfisch and H.L. Bertoni. A Theoretical model of UHF propagation in urban environments. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.36, 1988, pp.1788- 1796
87. F. Ikegami, T. Takeuchi, and S. Yoshida. Theoretical prediction of mean field strength for Urban Mobile Radio. IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.39, No.3, 1991.
88. COST | European Cooperation in Science and Technology. [Электронный ресурс] / сайт COST. — Режим доступа: <https://www.cost.eu/>
89. Дядюнов, А.Н. Логарифмически-нормальная модель распространения сигнала беспроводного канала связи для стандарта связи Virtualwire 433МГц [Электронный ресурс] / А.Н. Дядюнов, А.Е. Осененко, А.Р. Кадырбаева // Universum: Технические науки: электрон. научн. Журн. 2016. №5 (26). Режим доступа: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3224> (дата обращения: 01.12.2018).
90. Pallob Baidya, Siladitya Sen. Qualitative Analysis on Log-Distance Propagation Model for Wlan Standard. INDIAN JOURNAL OF RESEARCH. Vol. 3, Iss. 3, March 2014. pp.69-70.

91. A. Fanimokun and J. Frolik. Effects of natural propagation environments on wireless sensor network coverage area. in System Theory, 2003. Proceedings of the 35th Southeastern Symposium, pp. 16–20, IEEE, 2003.
92. Введенский, Б.А. К вопросу о распространении ультракоротких волн / Б.А. Введенский // Вестник теоретической и экспериментальной электротехники. – 1928. – №12. – с. 439-446.
93. R. Tewari, S. Swarup, and M. Roy, “Radio wave propagation through rain forests of India,” Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 4, pp. 433–449, 1990.
94. Recommendation ITU-R P.530-9. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
95. Recommendation ITU-R P.1238-7. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz.
96. John W. McKown R. Lee Hamilton, Jr. Ray Tracing as a Design Tool for Radio Networks. IEEE Network Magazine, November 1991, pp. 27-30.
97. Zhengqing Yun, Magdy F. Iskander. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications.
98. Electromagnetic Simulation Software & EM Modeling — Remcom. [Электронный ресурс] / сайт Remcom. — Режим доступа: <https://www.remcom.com>
99. Yee K. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION. VOL. AP-14, no. 3. MAY, 1966, pp. 302-307.
100. J. W. Schuster and R. I. Luebbers. Comparison of GTD and FDTD Predictions for UHF Radio Wave Propagation in a Simple Outdoor Urban Environment. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest, 3, 1997, pp. 2022-2025.

101. W. Ying, S. Safavi-Naeini, and S. K. Chaudhuri. A Hybrid Technique Based on Combining Ray Tracing and FDTD Methods for Site-Specific Modeling of Indoor Radio Wave Propagation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, VT-48, 5, May 2000, pp. 743-754.
102. A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, and S.G. Johnson. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Computer Physics Communications*, Vol. 181, pp. 687-702, 2010
103. Aleksandar Neškovic, Nataša Neškovic, Đorđe Paunovic. Indoor Electric Field Level Prediction Model Based on the Artificial Neural Networks. *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, VOL. 4, NO. 6, JUNE 2000, pp. 190-192.
104. Sarolic, Antonio, Matic, Petar. Wireless LAN Electromagnetic Field Prediction for Indoor Environment Using Artificial Neural Network. *AUTOMATIKA*, Vol.: 51, Issue: 3, pp.: 233-240, AUG-OCT 2010.
105. Oroza C. A., Zhang Z., Watteyne T. A Machine-Learning-Based Connectivity Model for Complex Terrain Large-Scale Low-Power Wireless Deployments. *IEEE TRANSACTIONS ON COGNITIVE COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, Vol: 3, Issue: 4, pp.: 576-584, DEC 2017.
106. 96% Efficient Synchronous Boost Converter datasheet. [Электронный ресурс] / сайт Texas Instruments. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61029.pdf>
107. Robinson S. *Simulation - The Practice of Model Development and Use*. Palgrave Macmillan, 2014.
108. *Conceptual modeling for discrete-event simulation*, Eds.: S. Robinson, R. Brooks, K. Kotiadis, D.-J. Van der Zee. CRC Press, 2011.
109. Gustafsson L., Sternad M. Consistent micro, macro, and state-based population modelling. *Mathematical Biosciences*. Vol. 225, iss. 2, pp. 94–107. doi:10.1016/j.mbs.2010.02.003

110. Niazi M., Hussain A. Agent based Tools for Modeling and Simulation of Self-Organization in Peer-to-Peer, Ad-Hoc and other Complex Networks. IEEE Communications Magazine. Vol. 47, iss. 3, pp. 163–173. doi: 10.1109/MCOM.2009.4804403
111. ns-3 | a discrete-event network simulator for Internet systems. [Электронный ресурс] / сайт nsnam. — Режим доступа: <https://www.nsnam.org/>
112. gnuplot homepage. [Электронный ресурс] / сайт gnuplot. — Режим доступа: <http://www.gnuplot.info/>
113. Кузнецов, С.В. Бортовые гетерогенные информационно-вычислительные сети перспективных воздушных судов / С.В. Кузнецов // Научный вестник московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2019. — Т. 22, №2. — с.16-27. — DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-16-27
114. Удодов, А.Н. Анализ возможностей построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей для мониторинга работы двигателей / А.Н. Удодов // Труды МАИ. — 2014. — № 74. — Режим доступа: <http://www.trudymai.ru/upload/iblock/3a6/3a653c775ec210e11c3ce99dd44a463c.pdf>
115. New world record for solar cell efficiency at 46 % [Электронный ресурс] / сайт Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems — Режим доступа: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>
116. Трифонова, Ю.С. Ветрогенераторы нового поколения для автономных систем энергоснабжения / Ю.С. Трифонова // 17-я межд. конф. «Авиация и космонавтика – 2018». Тезисы докладов.– М.: Издательство: Типография "Люксор", 2018. – с. 219-221.
117. Артамонов, О. Тестирование батареек формата AA [Электронный ресурс] / О. Артамонов. — сайт Ф-Центр — Режим доступа: <https://fcenter.ru/online/hardarticles/tower/23101>

118. Иванов, В.Ф. Повышение точности навигационных измерений одночастотной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS за счет применения оперативных данных о состоянии ионосферы / В.Ф. Иванов // Навигация и управление движением. Материалы докладов VIII Конференции молодых ученых. Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. 2006. — Изд-во ЦНИИ "Электроприбор". — С. 291-298.
119. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы. / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. — М.: Физматлит, 2007. — 336 с.
120. Смирнов, В.М. Метод радиопросвечивания ионосферы Земли и его практическая реализация / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова // VII Всероссийские армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской научной конференции. — Муром, 2017. — с. 129-139.
121. Werner D. Spire Global shares early data from GNSS Reflectometry satellites [Электронный ресурс] / сайт SpaceNews — Режим доступа: <https://spacenews.com/spire-gnss-reflectometry/>
122. Филонин, О.В. Математическое моделирование процедур радиотомографической реконструкции параметров ионосферы с помощью группировки наноспутников для условий неполных исходных данных / О.В. Филонин, П.Н. Николаев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017). Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. — 2017. — с. 1330-1342.
123. Косов, А.С. Космический эксперимент по измерению ионосферных задержек сигнала ИЗРС (ионосферные задержки радиосигнала) / А.С. Косов, А.А. Чернышов, М.М. Могилевский, Д.В. Чугунин, В.В. Корогод,

- В.А. Муницын, М. С. Долгоносков, Д.П. Скулачев // Исследования Земли из космоса. — 2018. — №6. — с. 13-23.
124. Палкин, М.В. Баллистико-навигационное обеспечение группового полета космических аппаратов / М.В. Палкин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2015. — №6. — С. 22–32.
125. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
126. Low Power 2.4 GHz Transceiver for ZigBee, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, RF4CE and ISM Applications [Электронный ресурс] / сайт Microchip — Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc5131.pdf>
127. IEEE 802.15.4™ 2.4 GHz RF Transceiver [Электронный ресурс] / сайт Microchip — Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MRF24J40-Data-Sheet-30009776D.pdf>
128. ZigBit™ 2.4 GHz Amplified Wireless Modules [Электронный ресурс] / сайт Microchip — Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc8228.pdf>
129. MeshConnect™ EM357 Mini Modules [Электронный ресурс] / сайт California Eastern Laboratories — Режим доступа: http://www.cel.com/pdf/datasheets/MeshConnect_EM357_Mini_Modules_DS.pdf
130. Funkmodul deRFmega256 23M12 [Электронный ресурс] / сайт Dresden Elektronik — Режим доступа: https://www.dresden-elektronik.com/files/dresden-elektronik/content/downloads/datenblaetter/_outdated/deRFmega256-23M12-DBT-de.pdf
131. ZigBee OEM Module ProBee-ZE10 User Guide [Электронный ресурс] / сайт Sena — Режим доступа: http://www.senanetworks.co.kr/download/manual/manual_probee_ze10-v1.6.pdf

132. AVR2052: BitCloud SDK Quick Start Guide [Электронный ресурс] / сайт Microchip — Режим доступа: http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-8200-BitCloud-SDK-Quick-Start-Guide_AP-Note_AVR2052.pdf
133. AVR2051: SerialNet [Электронный ресурс] / сайт Microchip — Режим доступа: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8389-WIRELESS-SerialNet_UserGuide_AVR2051.pdf
134. 2.4-GHz RF FRONT END [Электронный ресурс] / сайт Texas Instruments. — Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/gpn/CC2595/>
135. Решетнев, М.Ф. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах / М.Ф. Решетнев, А.А. Лебедев, В.А. Бартнев, М.Н. Красильщиков, В.А. Малышев, В.В. Малышев — М.: Машиностроение, 1988. — 336 с.
136. Лебедев, А.А. Встреча на орбите. Динамика полёта и управление космическим аппаратом / А.А. Лебедев, Б.В. Соколов — М.: Машиностроение. — 1969.
137. Малышев, В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В.В. Малышев, М.Н. Красильщиков, В.Т. Бобронников, О.П. Нестеренко, А.В. Федоров; Под редакцией В.В. Малышева. — М.: Изд-во МАИ, 2000. — 568 с.
138. Эльясберг, П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли / П.Е. Эльясберг — М.: Наука, 1965. — 540 с.
139. Дубошин, Г.К. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике / Г.К. Дубошин — М.: Наука, 1976. — 864 с.
140. IERS Technical Note 21 [Электронный ресурс] / сайт International Earth Rotation and Reference Systems Service. — Режим доступа: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn21.html>
141. Ермилов, Ю.А. Управление сближением космических аппаратов / Ю.А. Ермилов, Е.Е. Иванова, С.В. Пантюшин — М.: Наука, 1977. — 448 с.

142. Брайсон, А.Е. Прикладная теория оптимального управления. / А.Е. Брайсон, Хо Ю-Ши. — М.: Мир, 1972.
143. Гельфанд, И.М. Вариационное исчисление / И.М. Гельфанд, С.В. Фомин — М.: Физматгиз, 1961.
144. State of the Art of Small Spacecraft Technology [Электронный ресурс] / сайт NASA. — Режим доступа: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/soa_2021_1.pdf
145. USRP™ B200mini Series [Электронный ресурс] / сайт Ettus Research. — Режим доступа: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/USRP_B200mini_Data_Sheet.pdf
146. Miniature 2.4 GHz Wireless Modem. [Электронный ресурс] / сайт Microhard. — Режим доступа: <https://www.microhardcorp.com/brochures/n2420.Brochure.Rev.1.4.pdf>
147. Li-1 Radio. [Электронный ресурс] / сайт Astronautical Development. — Режим доступа: http://www.astrodev.com/public_html2/downloads/datasheet/LithiumUserManual.pdf