

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 2023 год

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная информатика» МАИ
Падалко Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Юркевич Евгений Владимирович,
главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

доктор технических наук, доцент
Карцан Игорь Николаевич,
старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»

доктор технических наук, доцент
Новиков Евгений Александрович,
начальник кафедры, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

Ведущая организация: **Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»**

Защита состоится «19» октября 2023 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=174003#

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Отзывы, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 125993, г.Москва, Волоколамское шоссе, д.4, МАИ, отдел Учёного и диссертационных советов МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.327.03,
доктор технических наук, доцент

А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, C. Bettstetter, C. Prehofer, F. Dressler, K. Römer, D. Marinescu, В.М. Вишневого, А.И. Ляхова, А.Е. Кучерявого, А.М. Баранова 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.

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.

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.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1

Первая глава диссертационной работы посвящена представлению БСС как самостоятельного класса подсистем в составе различных сегментов космических систем (КС), обоснованию целесообразности использования БСС в КС и необходимости разработки специального класса, учитывающего требования КС по обеспечению заданного уровня надёжности при одновременном снижении расхода энергии.

Рассмотрены группы задач, решение которых при помощи БСС добавляет новые, не достижимые иными способами возможности. Эти возможности обусловлены способностью БСС к долгосрочной работе в необслуживаемом режиме без предварительного создания инфраструктуры и при сверхнизком потреблении энергии.

К **первой группе** относятся задачи организации коммуникаций между наноспутниками компактной орбитальной группировки (ОГ). Характерными чертами задач первой группы являются небольшие расстояния между наноспутниками ОГ — десятки километров — и дефицит электрической энергии. Дефицит энергии обусловлен малыми размерами наноспутников, а, следовательно, и их панелей солнечных батарей. Применение БСС вместо более энергозатратной основы для коммуникаций обосновано тем, что БСС снижает остроту дефицита энергии, что открывает новые возможности, например, по использованию научной аппаратуры. Примерами задач первой группы являются задача передачи командной и телеметрической информации при стыковке наноспутников, а также задача организации коммуникаций внутри роя научных наноспутников, подробно рассмотренная в шестой главе.

Ко **второй группе** относятся задачи организации мониторинга на борту космического аппарата (КА). Например, система непрерывного мониторинга психофизиологического состояния экипажа КА, 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. Питание маяков осуществляется от гальванических элементов. Передача информации между маяками и бортовым медицинским компьютером выполняется при помощи БСС. В этом случае сверхнизкий расход энергии БСС обеспечивает необходимую долговечность измерителей, что позволяет достичь основной цели исследования — его непрерывности в течение заданного периода времени.

Другими примерами задач второй группы являются задача организации мониторинга раскрытия панелей солнечных батарей КА, задача организации мониторинга состава атмосферы пилотируемого КА.

Применение БСС в этой группе задач обосновано тем, что БСС обеспечивает бортовой системе мониторинга необходимые качества — долговечность, отсутствие требований к инфраструктуре, возможность оперативного развёртывания.

К **третьей группе** относятся задачи расширения возможностей дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за счёт специализированных БСС, обеспечивающих контроль недоступных космическому сегменту ДЗЗ параметров. Одним из примеров является система обнаружения и контроля тушения 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 очага подземного торфяного пожара по спутниковым снимкам. Система обнаружения и контроля тушения торфяных пожаров расширяет данные ДЗЗ за счёт их комбинирования с измерениями наземного сегмента, состоящего из сотен/тысяч узлов БСС, измеряющих температуру в подземном слое торфа.

Применение БСС обосновывается тем, что БСС расширяет возможности ДЗЗ, позволяя создавать производные продукты на основе данных Единой территориально-распределённой информационной системы (ЕТРИС) ДЗЗ. На базе ЕТРИС ДЗЗ также могут быть созданы производные продукты для интеллектуализации сельскохозяйственных предприятий (умные поля, умные фермы) и городских территорий (умный город).

Обобщая рассмотренные группы задач, можно сделать вывод о том, что применение БСС позволяет КС приобрести новые, недостижимые иными способами возможности, что свидетельствует о целесообразности использования БСС в составе КС.

Однако для получения преимуществ, обеспечиваемых применением БСС в космической системе, должен быть решён ряд сопутствующих проблем. Причины их возникновения обусловлены собственными характерными особенностями БСС, а также влияющими на БСС характерными особенностями КС. Наиболее значимыми собственными характерными особенностями БСС являются низкая мощность передатчиков и конкурентный доступ к каналу.

Низкая мощность передатчиков, позволяющая БСС расходовать энергию более экономно, чем другие стандарты цифровой связи, делает, как правило, невозможной непосредственную передачу информации от измерителя потребителю. 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).

Конкурентный доступ к каналу подразумевает использование единого частотного канала, доступ к которому соседние узлы получают в режиме конкуренции. Во избежание наложения в канале нескольких сообщений, называемого *коллизией*, любой узел, прежде чем начать свою передачу, 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 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.

Характерными особенностями КС, влияющими на БСС, являются необходимость снижения потребления энергии, изменение конфигурации и большой масштаб КС.

Необходимость снижения потребления энергии БСС при работе в составе КС вызывается изначальной мотивацией (организация коммуникаций в группировке наноспутников) или стремлением повысить долговечность узлов БСС при использовании автономных невозобновляемых источников питания (различные задачи мониторинга, расширение возможностей ДЗЗ). Для этого работа БСС организуется в *дискретном* режиме. Период работы T дискретной БСС состоит из активной фазы длительности τ и фазы сна. При практически полном отсутствии потребления энергии на фазе сна дискретный режим позволяет снизить потребление энергии в T/τ раз. Снижая потребление энергии, дискретный режим порождает необходимость согласования работы узлов. Кроме того, дискретный режим повышает риск 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.

Под **изменением конфигурации** будем понимать любое изменение в КС, делающее ранее найденный маршрут передачи информации недействительным и создающее угрозу потери результатов измерений: перемещение подвижных элементов КС, выход из строя узла БСС, изменение режима работы помех, перемещение любых нерадиопрозрачных препятствий. Все перечисленные случаи изменения конфигурации требуют перестроения маршрутов передачи сообщений в

БСС. Таким образом, любое изменение конфигурации приводит к риску потерь данных, требует нахождения новых маршрутов, повышая нагрузку на радиоканал.

Большой масштаб. Для многих КС характерны пространственная протяжённость в сочетании с большим количеством измерителей. Одним из примеров является рассмотренная система обнаружения и контроля тушения торфяных пожаров. Покажем, как большой масштаб КС влияет на БСС.

Увеличение количества измерений. Обслуживание более крупного объекта обычно сопровождается выполнением большего количества измерений, чем обслуживание менее крупного. Это увеличенное количество измерений должно быть доставлено в центр управления, что повышает нагрузку на канал.

Удлинение маршрутов. Ранее было показано, что низкая мощность передатчиков приводит к многошаговым маршрутам. С ростом масштаба объекта обслуживания повышается доля узлов, не имеющих возможности непосредственно взаимодействовать с центром управления. 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.

Необходимость ретрансляции чужих данных. 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 центру управления, тем в среднем больше количество результатов измерений, проходящих через него. Следовательно, для таких узлов повышается уровень конкуренции за канал.

Увеличение количества измерений, удлинение маршрутов и необходимость ретрансляции чужих данных повышают уровень конкуренции за радиоканал. Ранее было показано, что это ведёт к росту потерь данных и задержек в передаче сообщений. В дискретном режиме это вынуждает увеличивать продолжительность активной фазы, что приводит к повышению расхода энергии.

Таким образом, 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. В работе 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 обеспечит 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*. При использовании автономных невозобновляемых источников питания (ИП) расход энергии определяет долговечность как отдельных узлов, так и БСС в целом.

Проблема надёжности. Ранее было показано, что изменение конфигурации КС, дискретный режим работы БСС и большой масштаб КС повышают потери передаваемой информации. Поэтому сочетание названных факторов определяет 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*.

Таким образом, для получения показанных ранее преимуществ использования БСС в КС должны быть решены проблемы расхода энергии и надёжности. Совместное с учётом особенностей БСС и КС решение обеих названных проблем определяет *метод функционирования* создаваемой БСС.

В качестве показателей работы БСС используются масштабируемость, скорость доставки сообщений, возможность использования произвольных маршрутов, готовность, надёжность, долговечность и расход энергии. Учитывая, что при работе в составе КС для БСС критически важны проблемы расхода энергии и надёжности, будем оценивать работу БСС по показателям надёжности и расхода энергии.

Под **надёжностью** будем понимать отношение количества фактически доставленных в центр управления сообщений к количеству сообщений, которые должны быть доставлены. Надёжность может быть оценена как за весь срок работы БСС, так и на некотором кратком интервале, например, одном периоде работы. В последнем случае мы оперируем мгновенной надёжностью, которую для краткости будем называть просто надёжностью.

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.

При работе узла с использованием автономного невозобновляемого ИП большой интерес представляет *долговечность*, которую определим как продолжительность функционирования узла до выхода из строя в связи с исчерпанием запаса энергии ИП. 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.

Для долгосрочной оценки качества работы БСС мы будем задавать минимально допустимую надёжность и определять долговечность БСС. При краткосрочной оценке качества работы БСС будем использовать надёжность, а в качестве дополнительного показателя — средний расход энергии узлами за один период работы БСС.

Проанализируем применимость известных подходов к решению проблем расхода энергии и надёжности БСС для обслуживания КС.

Класс беспроводных самоорганизующихся сетей подвижных объектов *Mobile Ad Hoc Network* (MANET) специально предназначен для обслуживания объектов изменяемой конфигурации, но он ориентирован на работу в условиях отсутствия дефицита энергии. В работах, посвящённых дискретным MANET, рассматриваются значения T/τ , не превосходящие 4, что многократно ниже потребностей КС. Поэтому для обслуживания КС класс MANET не подходит.

Метод *S-MAC* (W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin) использует предварительное согласование передачи информации при помощи пары служебных сообщений RTS/CTS (P. Karn). Начав работу, узел некоторое время ожидает приёма расписания работы от своих соседей. Если узел получил расписание работы соседа, то он принимает его. Если расписание работы не получено, узел случайным образом создаёт собственное расписание и ширококовещательным сообщением информирует о нём своих соседей. При получении расписания работы соседа после создания и трансляции своего собственного, узел принимает оба расписания. При появлении у некоторого узла данных для передачи другому узлу, он во время активности второго узла передаёт сообщение, предваряя его служебной парой RTS/CTS. Недостатком *S-MAC* является то, что он вносит значительные задержки при передаче сообщений по многошаговым маршрутам, что неприемлемо при обслуживании КС.

Метод *SFSN* (D.C. Marinescu) разбивает работу сети 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. На рабочих фазах узлы взаимодействуют друг с другом в порядке, обратном тому, в котором они были подключены к сети на фазе самоорганизации. На рабочих фазах каждый узел уже имеет расписание работы, поэтому конкуренции за канал не возникает. Однако *SFSN* не всегда способен эффективно управлять работой БСС. При обслуживании объектов изменяемой конфигурации созданное расписание работы должно быть использовано немедленно, прежде чем оно успеет устареть вследствие изменения расположения узлов, помех и препятствий. Вновь включающийся в работу сети узел вынужден простаивать до начала следующей фазы самоорганизации, в результате которой он определит своё место во временной структуре взаимодействия. *SFSN* не способен противостоять нестационарным помехам: если помеха проявила себя на фазе самоорганизации, она будет учтена; если же помеха начала работу после фазы самоорганизации, то передачи узлов сети, запрограммированные ранее созданным расписанием, подвергнутся её воздействию и так будет продолжаться до следующей фазы самоорганизации. Совокупность названных причин делает метод *SFSN* неприменимым для обслуживания КС.

Методы работы многих БСС основаны на спецификации ZigBee. В этих БСС используются логические адреса узлов, что упрощает маршрутизацию сообщений и сокращает их размер. Однако использование логических адресов не обладает требуемым при обслуживании КС динамизмом, так как за время сна связи между узлами могут нарушиться. Назначение логических адресов в начале каждой активной фазы сопряжено с существенными затратами времени, что сокращает долговечность БСС. Кроме того, использование изменяющихся логических адресов затрудняет идентификацию источников измерений. Поэтому основанные на ZigBee методы функционирования БСС не пригодны для обслуживания многих КС.

Таким образом, на основании анализа известных классов БСС и методов их функционирования в работе сделан вывод о том, что ни один из них в полной мере не решает характерные для БСС в КС проблемы расхода энергии и надёжности.

Причиной этого является нацеленность известных классов БСС на одновременное достижение высоких значений всех характеристик БСС — расхода энергии, надёжности, возможности использования произвольных маршрутов и постоянной готовности. В то же время, проведённый в работе анализ показал, что при обслуживании КС критически важны характеристики расхода энергии и надёжности, а обеспечение возможности использования произвольных маршрутов и постоянной готовности — менее важны.

На этом основании в работе сделан вывод о том, что для обеспечения соответствия БСС потребностям КС необходимо разработать новый класс БСС, ориентированный на достижение соответствующих требованиям космических систем значений характеристик расхода энергии и надёжности за счёт отказа от обеспечения высоких значений других характеристик. В обеспечение проектирования БСС нового класса должны быть разработаны его модельно-алгоритмическое обеспечение, методика проектирования и необходимые инструментальные средства.

Глава 2

Во второй главе диссертационной работы представлены теоретические положения, определяющие класс БСС для космических систем.

Древовидная структура взаимодействия формируется в результате распространения по сети сетевой информации. При этом фиксируются маршруты передачи информации в соответствии с актуальной конфигурацией объекта обслуживания. Первым сетевую информацию отправляет шлюз — узел, через который БСС связана с центром управления. Другие узлы, приняв это сообщение, запоминают адрес его отправителя в качестве своего родителя в древовидной структуре. В дальнейшем этот адрес будет использован ими для передачи в центр управления своей и ретрансляции чужой информации. Сетевая информация используется также для синхронизации часов узла с эталоном. Получивший сетевую информацию узел ретранслирует её далее. Узел, не получивший сетевой информации, до конца периода участия в работе сети не принимает.

Использование физических адресов. При отправке сообщения конкретному узлу он идентифицируется при помощи физического адреса, не изменяющегося на протяжении всего времени существования узла. Использование физических адресов преследует две цели: избежать необходимости обмена служебными сообщениями между узлами, с которым сопряжено получение логического адреса, и упростить идентификацию источников информации.

Обновление адреса родителя узла в древовидной топологии позволяет сменить адрес узла, от которого первым поступило сообщение с сетевой информацией, на адрес узла, качество связи с которым выше. Вследствие конкурентного доступа узлов к каналу порядок, в котором потомки одного родителя, одновременно получившие сетевую информацию, ретранслируют эту информацию далее, случаен. Поэтому первым может быть получено сообщение с худшим качеством связи по сравнению с последующими сообщениями. В условиях воздействия помех использование маршрута с более низким качеством связи означает менее надёжную передачу информации. Поэтому узел сравнивает качество связи ранее принятого сообщения с сетевой информацией и

альтернативных сообщений. Если альтернативное сообщение пришло с более высоким качеством связи, не истёк интервал возможной смены родителя и источник нового сообщения находится в древовидной структуре не дальше от шлюза, чем источник ранее принятого сообщения (это требование позволяет избежать заикливания маршрута), происходит обновление адреса родителя.

Дискретный режим работы. Для повышения долговечности узлы БСС работают в дискретном режиме, чередуя фазы работы и фазы сна. На фазах работы сконцентрирована вся деятельность БСС по проведению измерений и доставке информации в центр управления. На фазах сна электронные компоненты узла переводятся в режим сниженного потребления энергии для повышения их долговечности. Величины токов потребления компонентов на активной фазе и фазе сна различаются в 10^4 - 10^5 раз.

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. Однако в задачах, требующих передачи информации с заданной периодичностью, например, в задачах мониторинга, дискретные БСС обеспечивают многократное снижение расхода энергии.

Синхронизация узлов на основе фактических задержек передачи сообщений. Дискретный режим порождает проблему синхронизации работы узлов сети — успешно взаимодействовать могут только узлы, находящиеся на своих активных фазах. Синхронизированное состояние не может быть установлено раз и навсегда, так как часы каждого из узлов обладают индивидуальной погрешностью, зависящей, в том числе, от условий эксплуатации. Поэтому синхронизация работы узлов должна выполняться периодически. Она заключается в приведении в соответствие показания собственных часов узла с эталонным значением, в качестве которого используется показание часов шлюза. Это показание распространяется по сети в составе сетевой информации. Поскольку передача сообщений в БСС происходит в режиме конкурентного доступа к каналу, распространение сетевой информации сопровождается случайными задержками. Их величину нельзя прогнозировать, но можно измерить. Для этого используются прерывания по началу приёма и трансляции сообщения. Измеренная величина задержки добавляется к эталонному значению времени при каждой ретрансляции сетевой информации. Принявший сетевую информацию узел синхронизирует собственные часы, используя эталонное значение времени.

Две активные фазы. Приём и передача сообщений распределены по активным фазам неравномерно: в начале активной фазы узел ретранслирует сообщение с сетевой информацией, остальная часть активной фазы отводится на передачу собственного результата измерения, приём и ретрансляцию результатов измерений других узлов. Чем больше глубина узла (под глубиной узла понимается количество шагов в передаче сообщения от шлюза), тем позже ему поступает сообщение с сетевой информацией, и тем раньше ему поступают результаты измерений для ретрансляции, рис. 1. Между окончанием интервала ожидания альтернативных предложений и поступлением результатов измерения узлов, находящихся на большей глубине, узел полезной работы не выполняет. Во избежание связанного с простоем лишнего расхода энергии в активную фазу

вставляется дополнительная фаза сна. Теперь активных фаз становится две: первая предназначена передачи сетевой информации и синхронизации (она обозначается АФС), вторая — для ретрансляции результатов измерений (она обозначается АФР). Фаз сна также становится две.

Расположение АФС и АФР на периоде работы зависит от глубины узла, рис. 2. Максимальная продолжительность сна между АФС и АФР ограничена подвижностью узлов — чем она выше, тем короче должна быть эта фаза сна.

Момент начала и длительность АФС в определении не нуждается — 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 $t^{АФР}$ относительно начала периода работы и длительность АФР $\tau^{АФР}$, рис. 3.

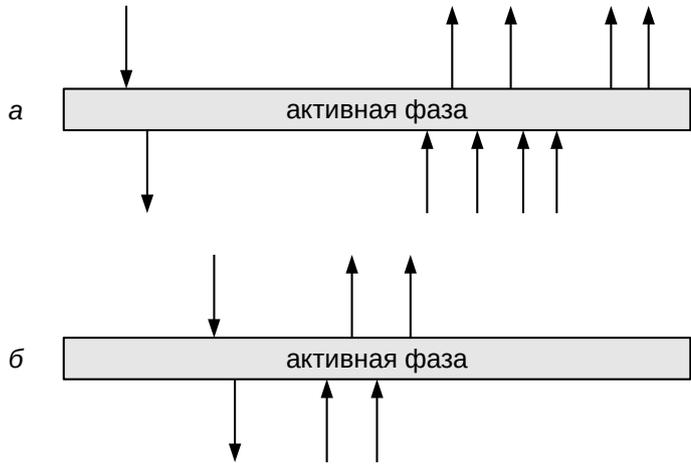


Рис. 1. Неравномерное распределение сообщений: а — узел ближе к корню, б — узел ближе к листьям дерева

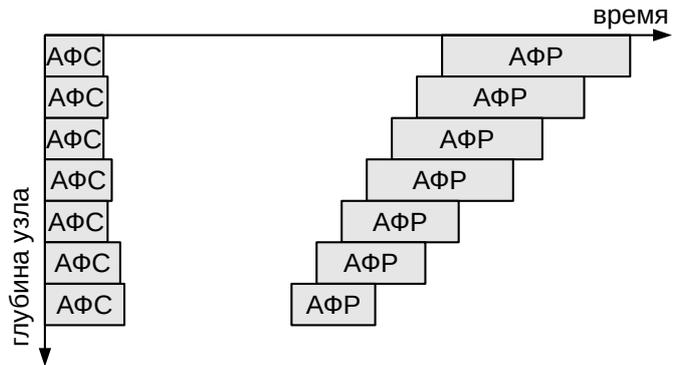


Рис. 2. Расположение АФС и АФР в зависимости от глубины узлов

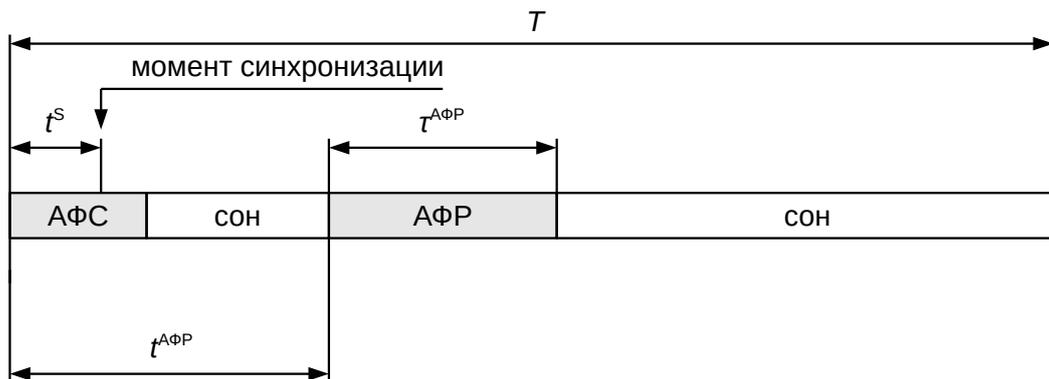


Рис. 3. Параметры расписания работы узла

Так как АФР родителя начинается позже, чем АФР потомка, АФР любого узла состоит 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. После начала АФР родителя узел может не только

накапливать сообщения с информацией других узлов, но и ретранслировать их своему родителю.

Адаптивное определение параметров АФР. Параметры расписания определяющим образом влияют на надёжность и расход энергии БСС. Вследствие изменения конфигурации объекта обслуживания $t^{\text{АФР}}$ и $\tau^{\text{АФР}}$ не могут быть определены заранее. Поэтому они определяются с учётом положения узла в сети и фактического потока информации через него. Смещение АФР узла определяется как смещение АФР родителя этого узла, уменьшенное на некоторую величину. Таким образом, максимальное значение смещения АФР, используемое шлюзом, по мере продвижения вглубь сети уменьшается. Оптимально было бы закончить АФР немедленно после ретрансляции последнего из результатов измерений потомков. Однако из-за отсутствия списка потомков, в том числе опосредованных, этот подход не реализуем. Поэтому узлы БСС самостоятельно определяют $t^{\text{АФР}}$ 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. АФР может быть продлена необходимое число раз.

Предотвращение передачи дубликатов результатов измерений. Вследствие ложного срабатывания механизма контроля доставки сообщений в БСС может произойти отправка дубликата ранее успешно доставленного сообщения. Передача дубликатов напрасно загружает канал на всех шагах многошагового маршрута. Во избежание этого на узле хранится список адресов потомков, чью информацию он уже успешно обработал. При поступлении сообщения от узла, чей адрес уже включён в этот список, сообщение признаётся дубликатом и отбрасывается. По окончании периода работы список обработанных узлов очищается.

Случайная задержка результата измерения. Потомки одного родителя, одновременно получившие сообщение с сетевой информацией, неявно синхронизированы между собой. Поэтому направляемые ими общему родителю сообщения концентрируются на кратком интервале времени. Ограниченное количество попыток отправки сообщения может привести к тому, что некоторые из них откажутся от конкуренции, и их сообщения будут потеряны. Это снижает надёжность БСС. Исключить такую возможность можно, распределив сообщения на более длительном интервале. С этой целью вводится случайная задержка отправки узлом своего результата (СЗР) измерения.

Алгоритм конкурентного доступа к каналу CSMA/CA уже содержит случайную задержку. Однако её величина невелика, так как она решает задачу выявить победителя среди небольшого числа конкурирующих за канал узлов. Задачей введения СЗР является снижение уровня нагрузки на канал до значения, позволяющего сообщениям постепенно покидать область БСС с повышенным уровнем конкуренции. По этой причине величина СЗР должна быть многократно выше величины задержки CSMA/CA, порядка $10 \div 100$ мс.

Буферизация сообщений, управляемая качеством связи с родителем. Сокращение размера передаваемой по сети информации может быть достигнуто передачей результатов измерений не по отдельности, а в виде буфера из

нескольких результатов. Размер передаваемой информации сокращается за счёт того, что заголовок, сопровождающий полезную часть сообщения, передаётся в этом случае лишь один раз. Однако вероятность успешного приёма сообщения большего размера в условиях воздействия помех ниже, чем для сообщения меньшего размера. Поэтому предельный размер буфера результатов ограничивается в зависимости от качества связи узла со своим родителем. Такой подход позволяет сократить потери на шагах маршрута с низким качеством связи и сократить трафик на шагах с высоким качеством связи.

Глава 3

В третьей главе работы представлена модель БСС для космических систем. Задача моделирования ставится следующим образом.

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

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

где N^{part} — количество составных частей, N^{int} — количество помех. Составная часть объекта обслуживания представляет собой пару из модели составной части J и закона её перемещения $X^G(t)$. Опустив индексы i , можно записать

$$G = (J, X^G(t)). \quad (2)$$

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

$$J = \{(B_i, \mu_i), 1 \leq i \leq N^{\text{bodies}}\}, \quad (3)$$

где B_i — геометрическая модель тела с номером i , μ_i — признак материала тела с номером i , N^{bodies} — общее количество тел, составляющих часть. Помеха определяется законом изменения спектральной плотности мощности её излучения и законом изменения её положения. Опуская индексы, можно записать

$$Z = (S(f, t), X^Z(t)), \quad (4)$$

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

Множество узлов БСС:

$$\Lambda = \{\Theta_i, 1 \leq i \leq N\}, \quad (5)$$

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

$$\Theta = (A, F, X^\Theta(t), E, V, H, \text{clock}(t)), \quad (6)$$

где A — уникальный физический адрес узла, F — роль узла в сети (выключен; шлюз; маршрутизатор; измеритель), $X^\Theta(t)$ — закон изменения положения узла, E — остаток энергии ИП узла, V — текущий режим работы компонентов узла (все компоненты спят; передача; приём; измерение; процессор спит, трансивер в режиме приёма), H — параметры аппаратуры узла, $\text{clock}(t)$ — показание часов узла в момент времени t .

Управляющие параметры Φ состоят из двух групп: $\Phi=(\phi, \varphi)$. Первая группа (ϕ) состоит из значений, определённых при проектировании дискретной БСС с двумя активными фазами, и в течение её работы не изменяющихся: ϕ_1 — максимальный интервал ожидания альтернативных предложений, ϕ_2 — двоичный логарифм 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. Вторая группа (φ) содержит смещение АФР шлюза относительно начала периода, динамически определяемое шлюзом на основании анализа текущей топологии.

Показателями работы дискретной БСС с двумя активными фазами являются надёжность и расход энергии, определяющий долговечность.

Надёжность R определяется как отношение количества фактически доставленных в центр управления сообщений к количеству сообщений, которые должны быть доставлены:

$$R = \frac{n^S}{n^A}, \quad (7)$$

где n^S — количество успешно доставленных в центр управления сообщений, n^A — количество сообщений, которые должны быть доставлены в центр управления. Мгновенная надёжность:

$$R(t) = \frac{n^S(t)}{n^A(t)}, \quad (8)$$

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

Расход энергии узла зависит от истории его работы и определяется как интеграл от текущей потребляемой мощности по времени.

Долговечность БСС определяется как продолжительность функционирования БСС, в течение которой текущий состав узлов обеспечивает надёжность не хуже заданного значения или, что то же самое, как продолжительность функционирования до достижения момента времени, когда надёжность БСС снизится до минимально допустимого уровня:

$$D = \arg(R(t) | R(t) = R^{\min}), \quad (9)$$

где D — долговечность БСС в целом, R^{\min} — минимально допустимая надёжность БСС. Схема моделирования показана на рис. 4.

Перед моделью БСС для космических систем стоят две задачи.

Первая задача: определить значение надёжности $R(t)$ при заданных объекте обслуживания Ω , множестве узлов БСС Λ , управляющих параметрах Φ

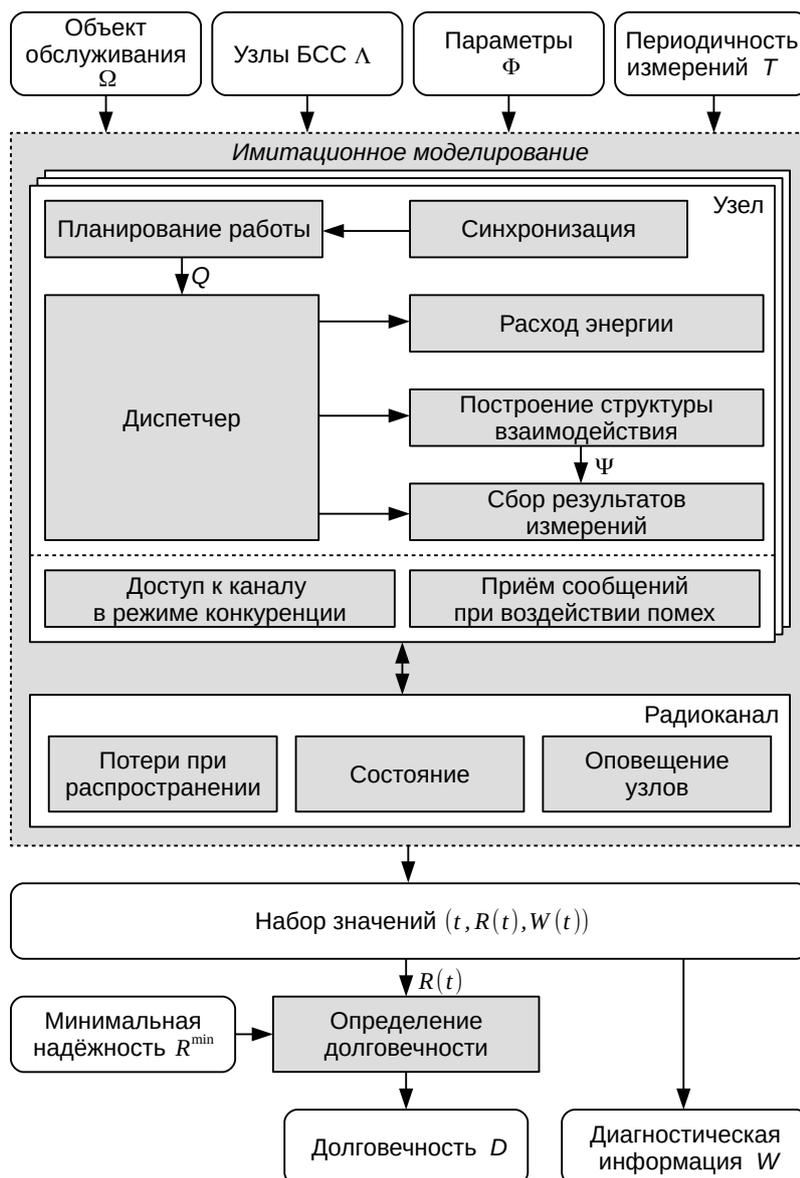


Рис. 4. Схема моделирования БСС

и требуемой периодичности выполнения измерений T ; в случае $R(t) < 1$ сформировать исчерпывающую диагностическую информацию W для определения причин, которые привели к снижению надёжности:

$$(\Omega, \Lambda, \Phi, T) \rightarrow (R(t), W). \quad (10)$$

Вторая задача: определить зависящую от расхода энергии долговечность БСС исходя из функции надёжности, полученной в ходе решения первой задачи, и заданного минимально допустимого значения надёжности:

$$(R(t), R^{\min}) \rightarrow D. \quad (11)$$

БСС — распределённая система, 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. Результатом имитационного моделирования работы БСС на протяжении n периодов является конечная последовательность

$$\Xi = \{ \xi_i \}_{i=1}^n, \quad \xi_i = (t_i, R(t_i), W(t_i)), \quad (12)$$

где ξ_i — результат работы БСС на i -ом периоде. Рассмотрим постановку основных задач моделирования.

Задачами **модели радиоканала** является определение потерь при распространении сигналов, учёт состояния и оповещение узлов о поступлении сообщения. Потери L при распространении на пути от передающей антенны X^{TX} до приёмной X^{RX} с учётом частей объекта обслуживания:

$$(M, \{G_i, 1 \leq i \leq N^{\text{part}}\}, X^{\text{TX}}, X^{\text{RX}}) \rightarrow L. \quad (13)$$

Начало и окончание передач узлов БСС, смена режима работы или перемещение помехи изменяет состояние канала K . Задача учёта состояния канала формулируется следующим образом:

$$(K, \text{start_tx}, X^{\text{TX}}, P^{\text{TX}}) \rightarrow K, (K, \text{end_tx}, X^{\text{TX}}, P^{\text{TX}}) \rightarrow K, \quad (14)$$

где start_tx — событие начала передачи сообщения, end_tx — событие окончания передачи сообщения. Для организации конкурентного доступа к каналу узлы БСС получают информацию о текущем состоянии канала в месте своего расположения:

$$(K, X^{\text{RX}}) \rightarrow \delta, \quad (15)$$

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

При оповещении узла о начале приёма сообщения ему сообщается, насколько приёму сообщения мешают помехи и другие передаваемые в канале сообщения. Оповещения узла не происходит, если трансивер находится в состоянии сна. Данная задача формулируется следующим образом:

$$(K, L, X^{\text{RX}}, P^{\text{RXmin}}, V) \rightarrow (\text{interrupt_rx}, \kappa), \quad (16)$$

где P^{RXmin} — чувствительность приёмника, interrupt_rx — прерывание на узле, начавшем приём сообщения, κ — соотношение мощностей полезного сигнала и всех прочих сигналов.

Основными задачами, стоящими перед **моделью узла** БСС, являются моделирование его автономной работы (синхронизации, планирования, диспетчеризации, расхода энергии ИП, участия в построении структуры взаимодействия, участия в сборе результатов измерений).

Синхронизация обеспечивает возможность согласования расписаний работы узлов и заключается в загрузке в часы узла эталонного значения времени $Reference(t)$. Задача синхронизации формулируется так:

$$\text{clock}(t) - Reference(t) \rightarrow 0. \quad (17)$$

Планирование работы узла отвечает за определение $t^{\text{АФР}}$ и $\tau^{\text{АФР}}$, а также момента начала АФС $t^{\text{АФС}}$ следующего периода. Задача планирования формулируется следующим образом:

$$(k, \hat{t}^{\text{АФР}}, \Phi, V) \rightarrow Q, \quad (18)$$

где k — глубина узла, $\hat{t}^{\text{АФР}}$ — смещение от начала периода работы АФР родителя, V — характеристики предыдущей работы узла, Q — расписание работы узла.

Диспетчер узла отвечает за смену режимов работы в соответствии с расписанием и инициирование соответствующих режиму действий:

$$(t, Q) \rightarrow V. \quad (19)$$

Моделирование расхода энергии обновляет запас энергии ИП узла. При исчерпании запаса энергии ИП этот узел включается в множество выключенных узлов W^{off} . Данная задача формулируется следующим образом:

$$(t, E, H, V) \rightarrow (E, F, W^{\text{off}}). \quad (20)$$

Участие узла в формировании пространственной структуры взаимодействия заключается в получении, обработке и ретрансляции сообщения с сетевой информацией. В соответствии с положениями второй главы сообщения с сетевой информацией Γ содержат следующие данные:

$$\Gamma = (A, T, t^S, t^{\text{АФР}}, k, q), \quad (21)$$

где A — адрес отправителя сообщения, T — период работы БСС, t^S — смещение синхронизации, $t^{\text{АФР}}$ — смещение АФР отправителя, k — глубина отправителя, q — качество связи отправителя со шлюзом. Одновременно с построением структуры взаимодействия выявляются узлы, не получившие сообщения с сетевой информацией, и потому не включённые в структуру взаимодействия. Поэтому задача построения структуры взаимодействия формулируется следующим образом:

$$(\Omega, \Lambda, \Phi, Q) \rightarrow (\Psi, W^{\text{out}}). \quad (22)$$

Участие узла в сборе результатов измерений заключается в передаче своих и ретрансляции чужих результатов. Шлюз подсчитывает количество полученных уникальных результатов измерения. Если к окончанию АФР результаты измерения некоторых узлов остались на промежуточных узлах маршрутов передачи данных, они включаются в диагностическую информацию. Задача моделирования сбора результатов ставится следующим образом:

$$(\Lambda, \Omega, \Psi, Q) \rightarrow (n^S, \{W^i, 1 \leq i \leq N\}). \quad (23)$$

Исходными данными для определения смещения АФР шлюза являются сведения о максимальной глубине k_{max} узлов в сети:

$$k_{\text{max}} \rightarrow \varphi. \quad (24)$$

Результатом имитационного моделирования является набор кортежей ξ_i надёжности и диагностической информации. Долговечность БСС определяется в результате обработки набора Ξ :

$$(\Xi, R^{\text{min}}) \rightarrow D. \quad (25)$$

Глава 4

В четвёртой главе работы представлена разработка и реализация инструмента для проведения исследований, направленных на выбор рациональных значений управляющих параметров модели, разработанной в третьей главе, — симулятора БСС для космических систем.

В исследуемой БСС значения переменных изменяются мгновенно в некоторые моменты времени, ассоциируемые с событиями. В промежутках между событиями никаких изменений в модели не происходит, все действия выполняются как реакция на происходящие события. Поэтому модель БСС построена с использованием дискретно-событийного подхода. Она состоит из обработчиков всех возможных событий.

Исследуемая БСС децентрализована, её поведение определяется действиями составляющих БСС узлов. Это позволяет применить к её моделированию агентный подход, предполагающий разработку автономного поведения отдельных объектов и правил взаимодействия между ними.

Таким образом, инструмент для исследования — симулятор БСС с двумя активными фазами — создан с использованием подходов дискретно-событийного и агентного моделирования.

В качестве платформы для построения симулятора дискретной БСС с двумя активными фазами используется симулятор сетей ns3. В первую очередь этот выбор обусловлен наличием в составе ns3 библиотеки готовых моделей, содержащей, в частности, модель LrWpan, позволяющую строить модели БСС в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4.

Симулятор включает в себя (рис. 5) ядро симуляции с очередью событий; модели радиоканала, измерителя и шлюза; подсистему ввода исходных данных; подсистему диагностической информации, статистики и журнала. Ядро симулятора с очередью событий и модель радиоканала унаследованы от ns3, остальные компоненты — оригинальные.

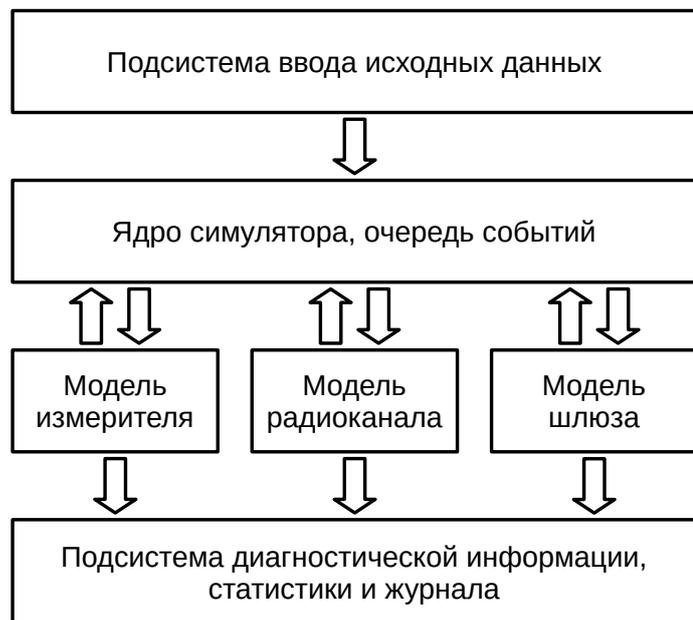


Рис. 5. Архитектура симулятора

Одной из задач, поставленных перед моделью БСС, является определение долговечности (25). Для этого симулятор должен моделировать расход энергии ИП (20). Однако модуль LrWpan не содержит законченных средств учёта состояния трансивера, необходимых для моделирования дискретного режима. Для решения этой проблемы объект узла 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.

Для сравнения эффективности дискретной БСС с двумя активными фазами и традиционной дискретной БСС была создана копия симулятора, в которой был изменён исходный код классов GatewayApp и SensorApp. Были исключены новые положения: две активные фазы; смещение активной фазы родителя относительно потомка; случайная задержка результата; буферизация сообщений; обновление адреса родителя; предотвращение передачи дубликатов результатов измерений. Перед обоими симуляторами была поставлена задача моделирования работы БСС, выполняющей мониторинг качества тушения торфяного пожара для

расширения информации, собираемой системой ДЗЗ. БСС состоит из 50 узлов, случайно распределённых на площади 250x250 м. Узлы обеих БСС оснащены автономными ИП с располагаемым запасом энергии 10 Дж. После исчерпания запаса энергии ИП узлы выходят из строя и в дальнейшей работе участия не принимают. При $R^{\min}=0.8$ долговечность дискретной БСС с двумя активными фазами составляет 415 периодов работы, рис. 6. Долговечность традиционной дискретной БСС составляет 200 периодов работы, рис. 7. Таким образом, в модельной задаче класс БСС с двумя активными фазами продемонстрировал эффективность, более чем в два раза превышающую эффективность традиционной БСС.

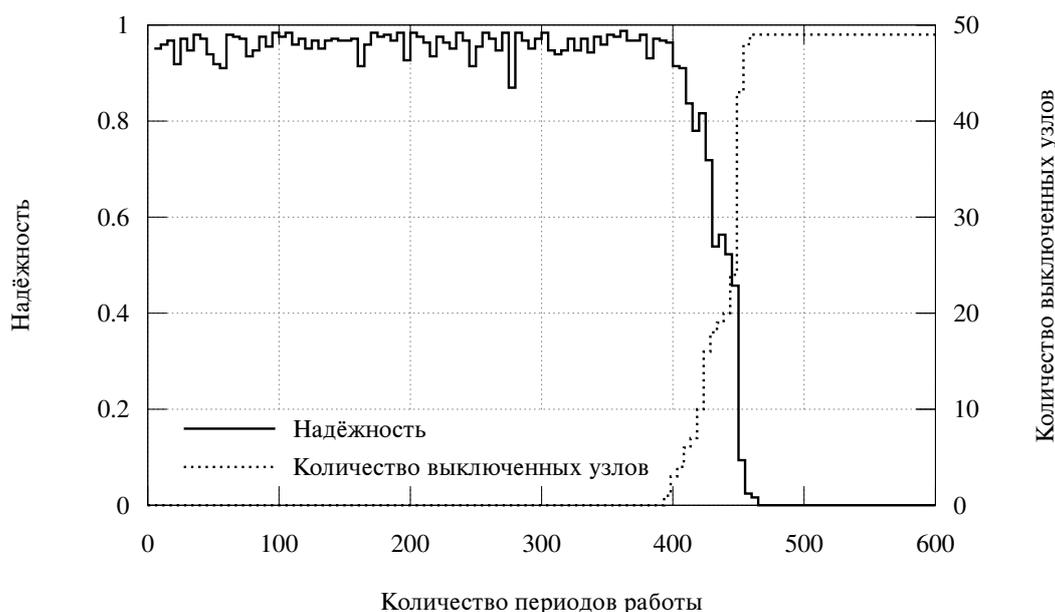


Рис. 6. Результаты работы БСС для космических систем

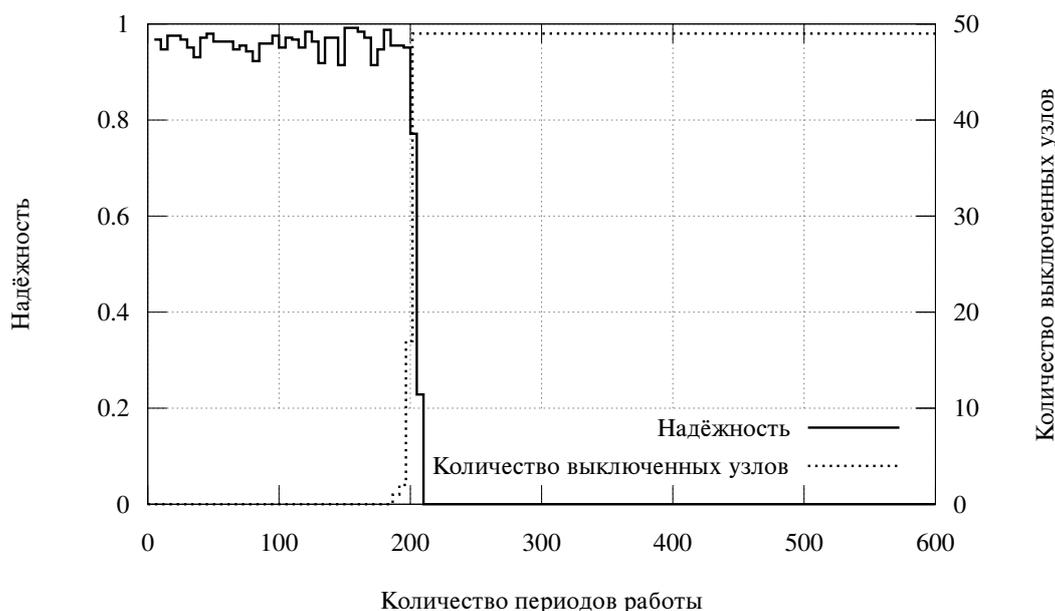


Рис. 7. Результаты работы БСС с одной активной фазой

Глава 5

В пятой главе диссертационной работы представлена основанная на использовании симулятора методика проектирования БСС для космических систем, см. рис. 8.

Подготовка модели объекта обслуживания заключается в выборе его СК, определении набора независимо перемещающихся частей и помех, выборе модели потерь при распространении радиоволн, задании мест выполнения и состава измерений.

Создание связной сети подразумевает подготовку условий для создания маршрутов от шлюза до любого из измерителей с учётом изменений конфигурации объекта. Обычно для обеспечения связности сети в неё необходимо добавить дополнительные узлы — маршрутизаторы.

Выбор типа ИП узлов позволяет при наличии возможности подключать некоторые узлы к ИП типа, отличного от автономных невозобновляемых.

Основным этапом методики проектирования является выбор рациональных значений параметров, обеспечивающих удовлетворительные значения показателей работы БСС.

Рассмотрим выбор значения параметра ϕ_9 (начальная длительность АФР узлов). Поиск будем выполнять в диапазоне $\phi_9 = 60 \div 140$ мс с шагом 20 мс.

На рис. 9 приведена зависимость надёжности БСС и среднего расхода энергии её узлами за один период работы от начальной продолжительности АФР в случае БСС из 50 узлов при $\phi_{10} = 20$ мс. Доверительные интервалы показаны 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. Если узлы БСС укомплектованы двумя элементами питания типоразмера АА напряжением 1.5 В и запасом энергии 2.35 Вт·ч каждый, средняя долговечность узлов превысит 1730 суток.

Глава 6

В шестой главе диссертационной работы представлено применение результатов, полученных в предыдущих главах работы, для решения задачи проектирования системы коммуникаций внутри группировки научных

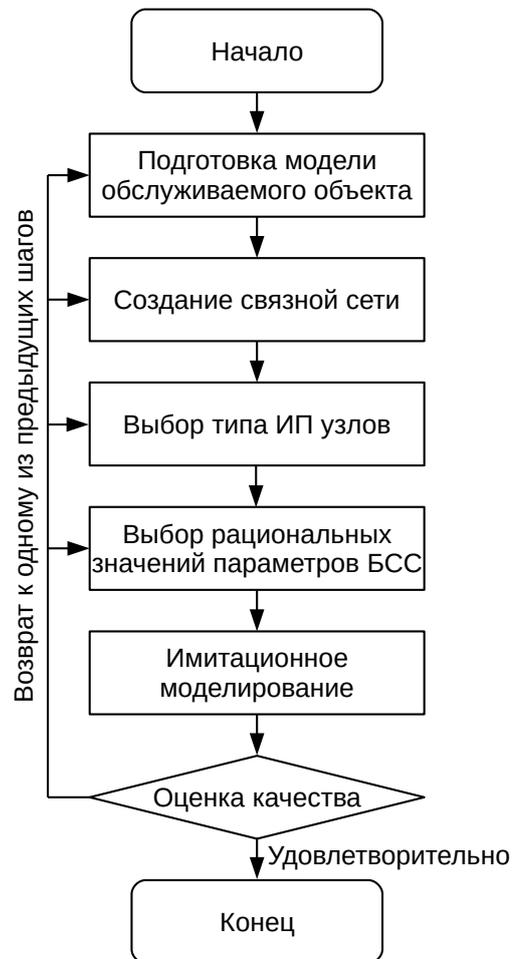


Рис. 8. Методика проектирования

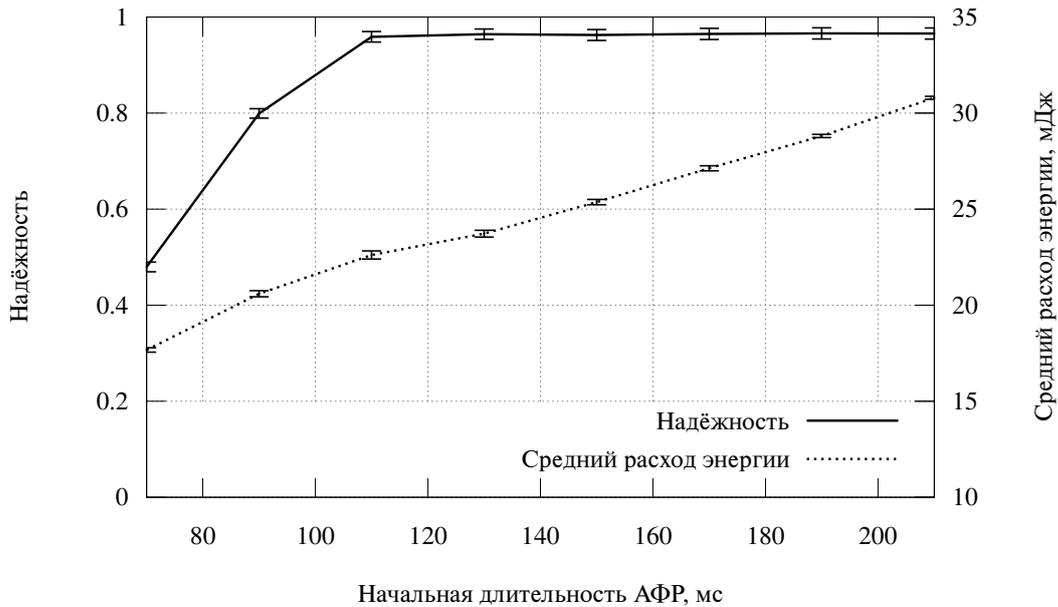


Рис. 9. Надёжность БСС и средний расход энергии узлами за один период работы в зависимости от начальной продолжительности АФР

наноспутников (СКГН), исследующей задержки прохождения навигационных радиосигналов через слой F_2 ионосферы. Вначале представлена разработка баллистической модели ОГ наноспутников, которая далее выступает в роли исходных данных для анализа и выбора параметров проектируемой БСС для названной задачи.

Поясним решаемую группировкой наноспутников задачу.

Условия прохождения радиоволн через ионосферу определяются электронной концентрацией, т. е. количеством свободных электронов в единице объёма. Распределение электронной концентрации в ионосфере не постоянно, оно подвержено колебаниям и случайным возмущениям. Результатом наличия в ионосфере областей с различными значениями электронной концентрации являются нерасчетные запаздывания распространения радиосигналов, что при приёме сигналов глобальных навигационных систем ведёт к ошибкам позиционирования. Для парирования таких ошибок применяются модели ионосферы, обновляемые в оперативном режиме 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, в качестве источников которых часто используются спутники глобальных навигационных систем. 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 таких станций отсутствует над поверхностью океанов и в труднодоступных местах Земли. Кроме того, доступ к данным находящимся за пределами России станций может быть ограничен. Без оперативного обновления модели ионосферы возрастут ошибки позиционирования использующих ГЛОНАСС потребителей при их работе за границей. Для предотвращения подобного снижения точности позиционирования предлагается рассмотреть возможность использования вместо

наземной сети станций 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. При проведении КЭ «Сеть РТ» предлагается ограничиться исследованием слоя F_2 ионосферы, так как он подвержен наибольшей ионизации и в нем присутствуют сильные возмущения.

Решаемая задача определяет баллистическое построение ОГ. Опорная орбита группировки (орбита лидера) — круговая высотой 400 км. Орбиты наноспутников некомпланарны, рис. 10. Количество наноспутников как компромисс между точностью восстановления распределения электронного содержания и условиями выведения группировки составляет 24. Все наноспутники должны располагаться в области размером 50 км (вдоль опорной орбиты) x 15 км x 15 км. Взаимодействие с наземным командным пунктом (НКП) должен осуществлять только лидер ОГ, остальные — спутники — должны получать от лидера команды и передавать лидеру результаты своих измерений через СКГН. Для предотвращения нарушения компактности ОГ НС должны быть оснащены двигательной установкой (ДУ). Формат наноспутников — Cubesat 1U.

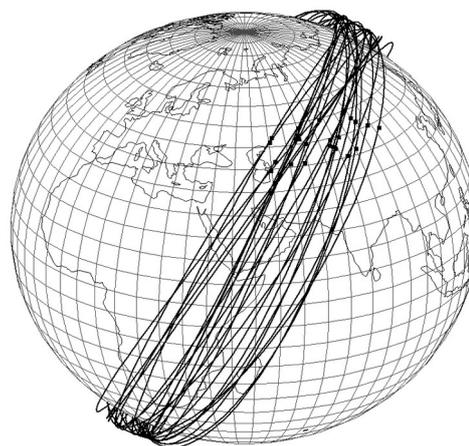


Рис. 10. Орбиты наноспутников группировки

Наноспутники группировки обеспечиваются энергией, вырабатываемой фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) и запасаемой в накопителе. Малые размеры наноспутников определяют малый размер панелей ФЭП и, следовательно, малое количество располагаемой энергии. ДУ на спутнике и аппаратура связи с НКП на лидере являются критически важными потребителями энергии. Следовательно, для обеспечения работы таких потребителей вся остальная аппаратура наноспутника должна потреблять как можно меньше энергии.

Требование минимального потребления энергии в полной мере применимо и к СКГН. Для неё актуальны те же проблемы (обеспечение заданной надёжности при минимальном потреблении энергии), которые привели к разработке класса БСС для космических систем. Поэтому при проектировании СКГН использована БСС этого класса. Лидер выполняет функции шлюза, а спутники — измерителей. Проектирование БСС выполняется в соответствии с представленной на рис. 8 методикой. В результате проектирования должны быть определены параметры радиоаппаратуры связи внутри группировки и параметры работы БСС, на основе которой создаётся СКГН.

Для связи внутри группировки из имеющихся на рынке компонентов выбран трансивер Atmel AT86RF230 в сочетании с усилителем мощности Texas Instruments CC2595. Это позволяет передавать сообщения между узлами при потерях на распространение до 124 дБ. Для управления работой узла БСС выбран микропроцессор MSP430F5438A.

В качестве СК группировки наноспутников используется связанная орбитальная СК (СОСК) лидера. В качестве модели потерь при распространении радиоволн используется модель потерь в свободном пространстве.

В начале эксплуатации группировки связность БСС обеспечивается условиями выведения наноспутников. В результате воздействия возмущений, в основном под влиянием второй зональной гармоники геопотенциала, орбиты наноспутников изменяются. Для обеспечения компактности группировки и связности БСС орбиты спутников корректируются при помощи ДУ. Для обеспечения выполнения коррекции орбиты спутников в состав сетевой информации добавлена передача параметров орбиты лидера.

Симулятор СКГН строится с учётом следующих обстоятельств. Первое — согласно постановке задачи положение наноспутников относится к исходным данным симулятора. Второе — итерационный характер методики проектирования (см. рис. 8) предусматривает многократное моделирование работы БСС при неизменных траекториях её узлов. Поэтому для ускорения работы моделирование было разделено на два этапа: определение положения наноспутников для каждой активной фазы и симуляция работы БСС. При этом в начале каждой активной фазы положение узлов БСС задаётся в соответствии с ранее определённым. Информация о положении узлов передаётся между исполняемыми файлами обоих этапов через внешний файл, рис. 11. За однократным исполнением первого этапа следует многократное исполнение второго этапа.

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 определяется их положением в структуре взаимодействия. Однако сочетание малости различий между началом АФР различных наноспутников группировки (несколько 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.

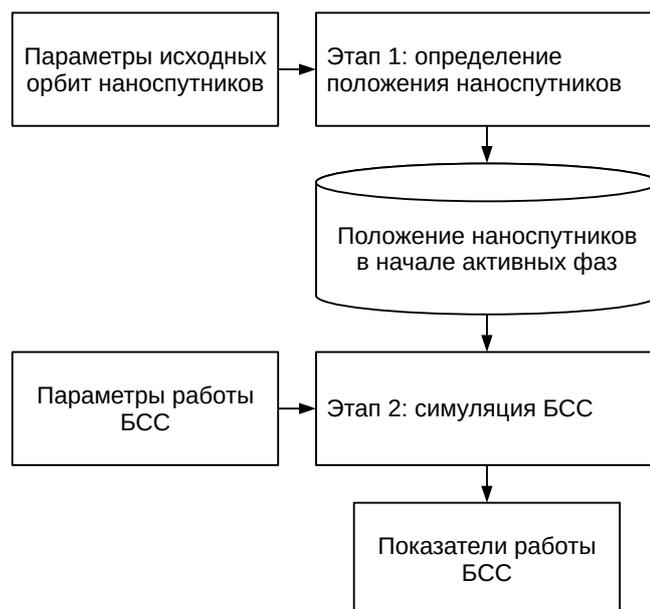


Рис. 11. Два этапа моделирования группировки наноспутников

Поэтому использование положения наноспутников, определённого на единый для всех наноспутников момент начала АФР, оправдано.

Перед моделированием все параметры, определяющие работу БСС, были разделены на две группы. Первую группу составили параметры, значения которых были выбраны без имитационного моделирования. Вторую группу составили параметры, для определения рациональных значений которых проводилось исследование некоторого диапазона возможных значений. Было выполнено имитационное моделирование подсистемы управления измерениями для всех 1080 комбинаций параметров. Из полученных результатов были отброшены не удовлетворяющие требованию по надёжности $R^{\min}=0.9$. Среди оставшихся результатов найдены эффективные по Парето, рис. 12. Наименьший средний расход энергии при выполнении ограничения на надёжность обеспечивает следующее сочетание параметров работы БСС: верхняя граница интервала СЗР $\phi_3=15$ мс, начальная длительность АФР $\phi_9=70$ мс, квант продления АФР $\phi_{10}=20$ мс, смещение АФР родителя относительно потомка $\phi_{11}=35$ мс. Это сочетание обеспечивает надёжность 0.908 при среднем расходе энергии 24.96 мДж.

Сопоставление найденного в результате имитационного моделирования среднего расхода энергии узлами БСС для космических систем с расходом энергии используемыми на сегодняшний день в составе наноспутников системами связи, перечисленными в отчёте NASA «State-of-the-Art Small Spacecraft Technology» за 2021 г., показало, 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.

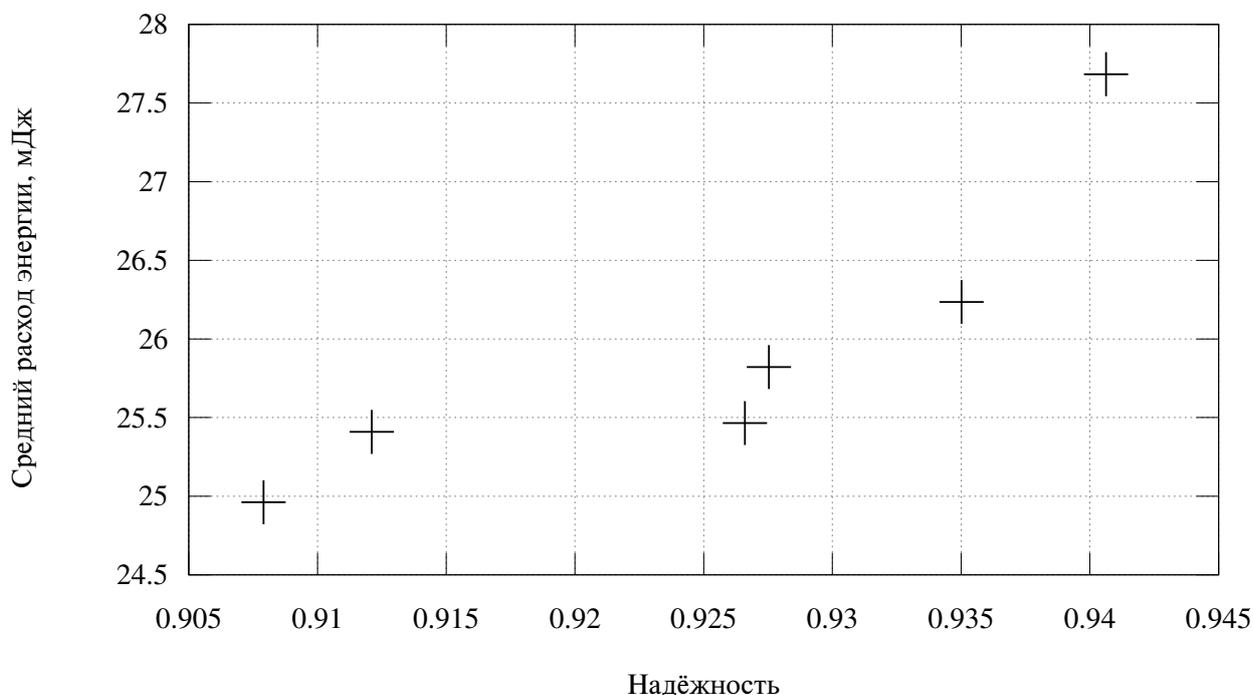


Рис. 12. Эффективные по Парето результаты

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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. (6 с. авт., №289, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
2. Терентьев, М.Н. Имитационная модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / М.Н. Терентьев // Вестник Московского авиационного института.– Москва: МАИ, 2010. – Т.17. – №3. – с. 178-183. (6 с. авт., №289, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 3. 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. (3 с. авт., №289, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 4. Махорин, А.О. Постановка задачи оптимизации параметров процедуры смены роли узлов многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии в аэрокосмической системе / А.О. Махорин, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // Научно-технический вестник Поволжья.– Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – № 5. – с. 260-263. (3 с. авт., №1354, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 5. Махорин, А.О. Симуляция многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии с учетом решения задачи выбора оптимальных параметров сети / А.О. Махорин, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // Научно-технический вестник Поволжья.– Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – №6. – с. 228-232. (3 с. авт., №289, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 6. Махорин, А.О. Постановка задачи оптимизации размещения узлов многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии в аэрокосмической системе / А.О. Махорин, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // Научно-технический вестник Поволжья.– Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – № 6. – с. 233-236. (3 с. авт., №289, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 7. Махорин, А.О. Математическая модель многошлюзовой беспроводной самоорганизующейся сети произвольной топологии в аэрокосмической системе / А.О. Махорин, С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев // Вестник компьютерных и информационных технологий.– Москва: Издательский дом "Спектр", 2015. – № 3. – с. 28-32. (3 с. авт., №262, перечень ВАК действ. до 30.11.2015 г.)
 8. Падалко, С.Н., Терентьев М.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. – DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-75-85. (8 с. авт., №365, перечень ВАК по группам научных специальностей)
 9. Терентьев, М.Н. Обзор публикаций, посвящённых самоорганизации беспроводных сенсорных сетей / М.Н. Терентьев // Труды МАИ. – 2017. –

- №94, http://mai.ru/upload/iblock/43d/terentev_rus.pdf (31 с. авт., №2030, перечень ВАК по группам научных специальностей)
10. 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. (5 с. авт., №2269, перечень ВАК по группам научных специальностей)
 11. 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. (4 с. авт., №2269, перечень ВАК по группам научных специальностей)
 12. Терентьев, М.Н. Показатели работы дискретных беспроводных сетей интернета вещей / М.Н. Терентьев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №11. – С. 258–260. (3 с. авт., №1398, перечень ВАК по группам научных специальностей)
 13. Макашов, А.А. Помехоустойчивый сетевой уровень стека протоколов для беспроводной сенсорной сети древовидной топологии / А.А. Макашов, М.Н. Терентьев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – №1. – с. 135-147. DOI 10.18698/0236-3933-2021-1-135-147 (8 с. авт., №416, перечень ВАК от 22.12.2020)

В рецензируемых изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

1. A. Makhorin, M. Terentiev. Choosing optimal node roles in a multi-gateway wireless ad hoc network. Yugoslav Journal of Operations Research. Vol. 31 (2021). Number 4. pp. 547-556. DOI: 10.2298/YJOR200717030M (7 с. авт., Scopus)
2. A. Makashov, A. Makhorin, M. Terentiev. Anti-jamming Wireless Sensor Network Model. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. Vol. 16. 2022. pp. 352-359. Art. #43. DOI: 10.46300/9106.2022.16.43 (5 с. авт., Scopus)

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

1. Терентьев, М.Н. Симулятор систем мониторинга параметров объектов с изменяемой конфигурацией на базе дискретных беспроводных сенсорных сетей / М.Н. Терентьев. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617807, 2010.
2. Попов, С.Н. Универсальный симулятор беспроводных ad hoc сетей / С.Н. Попов, М.Н. Терентьев, А.Ю. Ярыгин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618880, 2012.
3. Махорин, А.О. Программа поиска оптимальных маршрутов передачи данных в многошлюзовых беспроводных самоорганизующихся сетях / А.О. Махорин, М.Н. Терентьев. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613539, 2014.
4. Махорин, А.О. Оптимизация параметров алгоритма маршрутизации в многошлюзовых беспроводных самоорганизующихся сетях / А.О. Махорин, С.Н. Падалко, В.А. Степаненко, М.Н. Терентьев, Д.Н. Чуркин.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660799, 2014.

5. Гинзбург, И.Б. Подсистема позиционирования узлов беспроводной сенсорной сети для автономного веб-интерфейса / И.Б. Гинзбург, М.Н. Терентьев. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610781, 2018.
6. Гинзбург, И.Б. Программа моделирования помех работе узлов Интернета вещей / И.Б. Гинзбург, А.А. Макашов, М.Н. Терентьев. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610121, 2019.

Монография

1. Падалко, С.Н. Мониторинг параметров объектов изменяемой конфигурации с использованием дискретной беспроводной сенсорной сети / С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев – М.: Изд-во МАИ, 2019. – 160 с. – ISBN 978-5-4316-0668-7.

Учебные пособия

1. Терентьев, М.Н. Беспроводные сенсорные сети: Учебное пособие / М.Н. Терентьев – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – 96 с.
2. Падалко, С.Н. Автоматизированное проектирование адаптивных дискретных беспроводных сенсорных сетей для космических систем: Учебное пособие / С.Н. Падалко, М.Н. Терентьев – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 128 с.
3. Терентьев М.Н. Прикладные программно-информационные системы: Учебное пособие по курсовой работе / М.Н. Терентьев – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 80 с.