

На правах рукописи

Иванов Валерий Игоревич

**Методы многопутевой маршрутизации  
с балансировкой нагрузки и обработки информации  
о местоположении абонентских терминалов  
в низкоорбитальных спутниковых системах связи  
с межспутниковыми линиями**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2020

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Научный руководитель: Терешонок Максим Валерьевич – д.т.н., доцент, ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ), заведующий научно-исследовательской лабораторией

Официальные оппоненты: Пономарев Дмитрий Юрьевич – д.т.н., доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры радиоэлектронной борьбы военно-инженерного института.

Гайдамака Юлия Васильевна – д.ф.-м.н., доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (ФГАОУ ВО РУДН), доцент кафедры систем телекоммуникаций

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР)

Защита диссертации состоится «22» сентября 2020 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д.219.001.04 в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, аудитория А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ:

<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Ivanov/dis-Ivanov.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 219.001.04

д.т.н., доцент

Терешонок М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Оптимальное управление трафиком в низкоорбитальных спутниковых сетях связи (НССС) является важной научной задачей. Сложность данной задачи обусловлена непостоянством взаимного расположения спутников и их движением относительно абонентов. В соответствии с концепцией федеральной целевой программы «Комплексное развитие космических информационных технологий на период 2020-2030 годы» в ближайшие годы ожидается увеличение количества связных спутников и многократный рост нагрузки на спутниковую инфраструктуру, что приведёт к необходимости разработки новых методов оптимального управления нагрузкой и маршрутизацией в НССС. Приведённые обстоятельства обуславливают актуальность темы диссертационного исследования.

**Объектом исследований** выбраны низкоорбитальные спутниковые сети связи, а **предметом исследований** – методы маршрутизации и обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС.

### **Степень разработанности темы**

Управлению трафиком в спутниковых сетях связи посвящено достаточное количество работ, не утративших актуальность и по сей день. К настоящему времени (2020 г.) в трудах Чечина Г.В., Азина Н.В., Камнева В.Е., Кучерявого А.Е., Лазарева В.Г., Лазарева Ю.В. заложены необходимые научные предпосылки для решения проблемных вопросов централизованного поиска местоположения абонентских терминалов и QoS маршрутизации с использованием одного маршрута. В то же время, проблеме распределённого хранения на спутниках данных о местоположении абонентских терминалов исследователи до сих пор (2020 г.) уделяют недостаточно внимания. Проблематика оптимальной маршрутизации с учётом множества путей между разными спутниками в настоящий момент также недостаточно проработана.

**Целью диссертационного исследования** является повышение эффективности передачи данных в НССС за счёт использования новых методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов и новых методов маршрутизации.

Для достижения цели диссертационного исследования поставлена **научная задача** разработки новых, более эффективных методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов и маршрутизации в НССС.

Для решения научной задачи и достижения цели диссертационного исследования в работе поставлены и решены три **частные научные задачи**.

1. Разработка и исследование метода распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС.
2. Разработка и исследование метода централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС.
3. Разработка и исследование метода распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС.

**Научная новизна** результатов исследования состоит в следующем.

1. Разработан метод распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС. Разработанный метод обеспечивает меньшую задержку ответа на запрос местоположения, чем другие существующие методы обработки информации о местоположении в НССС. Разработанный метод, в отличие от других существующих, работает без использования земных станций, что делает спутниковую

группировку независимой от наземного сегмента в рамках обработки информации о местоположении.

2. Разработаны методы централизованной и распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС, обеспечивающие значительное снижение вероятности потери пакетов и повышение пропускной способности НССС по сравнению с другими существующими методами.

**Теоретическая значимость** работы обусловлена вкладом в два научных направления:

- 1) развитие методов распределённой обработки служебной геоинформации в сетях с динамически меняющимися связями;
- 2) развитие методов многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в сетях с динамически меняющимися связями.

**Практическая значимость** работы обусловлена возможностью применения разработанных методов для эффективного управления передачей данных в НССС и, как следствие, для повышения пропускной способности НССС и снижения вероятности потери пакетов в НССС. Созданные методы можно применить не только в НССС, но и в спутниковых системах с другим типом орбит, а также в наземных децентрализованных сетях связи. Практическая значимость работы подтверждена актами о практическом использовании разработанных в ходе диссертационного исследования методов.

#### **Личный вклад**

Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно.

**Достоверность** результатов, полученных в ходе диссертационной работы, обеспечена выбором непротиворечивого и адекватного рассматриваемым задачам математического аппарата. Результаты имитационного моделирования подтверждают предложенные теоретические выкладки.

#### **Методология и методы исследования**

В работе использованы методы теории алгоритмов, теории оптимизации, теории вероятностей, теории графов, теории эволюционных алгоритмов, теории множеств, статистического моделирования, системного компьютерного моделирования для разработки методов маршрутизации и обработки информации о местоположении в НССС.

#### **Апробация и публикации результатов**

По материалам исследования всего опубликовано 13 научных работ. Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 печатных публикациях в рецензируемых изданиях из списка ВАК. Все работы, опубликованные в научно-технических изданиях, написаны без соавторов.

Материалы диссертационной работы были доложены и одобрены на шести научно-технических конференциях.

1. Шестая Отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», Москва, МТУСИ, 14 – 15 февраля 2012 г.
2. Седьмая Отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», Москва, МТУСИ, 20 – 21 февраля 2013 г.
3. Восьмая Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», Москва, МТУСИ, 20 – 21 февраля 2014 г.
4. Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем, Москва, РУДН, 22–25 апреля 2014 года.

5. Девятая Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», Москва, МТУСИ, 24 марта 2015 г.
6. Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC – 2017», Москва, МИРЭА, 20 – 24 ноября 2017.

#### **Реализация и внедрение результатов**

Полученные в ходе диссертационного исследования алгоритмы, программы и методики их применения реализованы в НИР «Перспективы развития сетей спутниковой связи в интересах Российской Федерации на период до 2030 года» и НИР «Мыслитель-2015», выполненных по Государственному заказу в МТУСИ в 2018-2019 гг.

Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ [5].

#### **Структура и объём работы**

Текст диссертации изложен на 195 страницах и включает введение, четыре раздела, заключение и приложение. Список литературы содержит 83 наименования. В работе представлены 63 рисунка и 31 таблица.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Метод распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС обеспечивает уменьшение задержки ответа на запрос местоположения в 1,1 – 12 раз и ограничивает максимальное количество служебных пакетов, в отличие от существующих методов обработки информации о местоположении абонентов.
2. Метод централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС обеспечивает снижение вероятности потери пакетов в 1,7 раза и повышение пропускной способности системы на 6% по сравнению с существующими методами.
3. Метод распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС обеспечивает снижение вероятности потери пакетов в 1,5 раза и повышение пропускной способности системы на 12% по сравнению с существующими методами.

#### **Соответствие положений, выносимых на защиту, выбранной специальности**

Выносимые на защиту положения соответствуют специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Положения 1, 2 и 3 входят в определённые в паспорте специальности области исследований № 4, № 11 и № 14, включающие «исследование путей совершенствования управления информационными потоками», «разработку научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования» и «разработку методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная и практическая ценность работы, указаны основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **первом разделе** «Классификация и анализ методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов и методов маршрутизации в НССС» проведён анализ методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов (ОИюМАТ) и маршрутизации в низкоорбитальных спутниковых системах связи (НССС). Множество задач ОИюМАТ и маршрутизации решили Чечин Г.В., Азин Н.В., Камнев В.Е., Дас С., Джинглин В., Кучерявый А.Е., Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В., Чечин Г.В., Азин Н.В., Камнев В.Е., Тафт-Плоткин, Лю, Беллур, Кинг и другие.

В результате рассмотрения существующих методов ОИюМАТ стало ясно, что не предложено распределённых методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов. Ожидается, что их достоинство по сравнению с централизованными методами, хранящими информацию о местоположениях на ЦЗС или нескольких ЗС, может состоять в том, что информация может храниться распределённо на спутниках. Это позволит уменьшить время ответа на запрос о местоположении, а также сделает спутниковый сегмент независимым от наземного в рамках хранения и обновления информации о местоположении абонентов. На рисунке 1 показана классификация методов ОИюМАТ.

В результате рассмотрения методов маршрутизации в спутниковых системах было выяснено, что хорошо разработаны методы распределённой однопутевой маршрутизации. Методы централизованной однопутевой и многопутевой маршрутизации и методы распределённой многопутевой маршрутизации почти не представлены. Ещё меньше представлены методы маршрутизации с балансировкой нагрузки. Методы маршрутизации с балансировкой нагрузки вместо поиска оптимальных маршрутов отдельно для каждой пары спутников ищут маршруты, оптимизирующие пропускную способность спутниковой системы в целом, что крайне важно ввиду малой и дорогой пропускной способности спутниковых систем в сравнении с наземными. Классификация методов маршрутизации с балансировкой нагрузки представлена на рисунке 2.

По результатам анализа поставлены три частные научные задачи.

1. Разработка и исследование эффективности метода распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС.
2. Разработка и исследование метода централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС.
3. Разработка и исследование метода распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС.

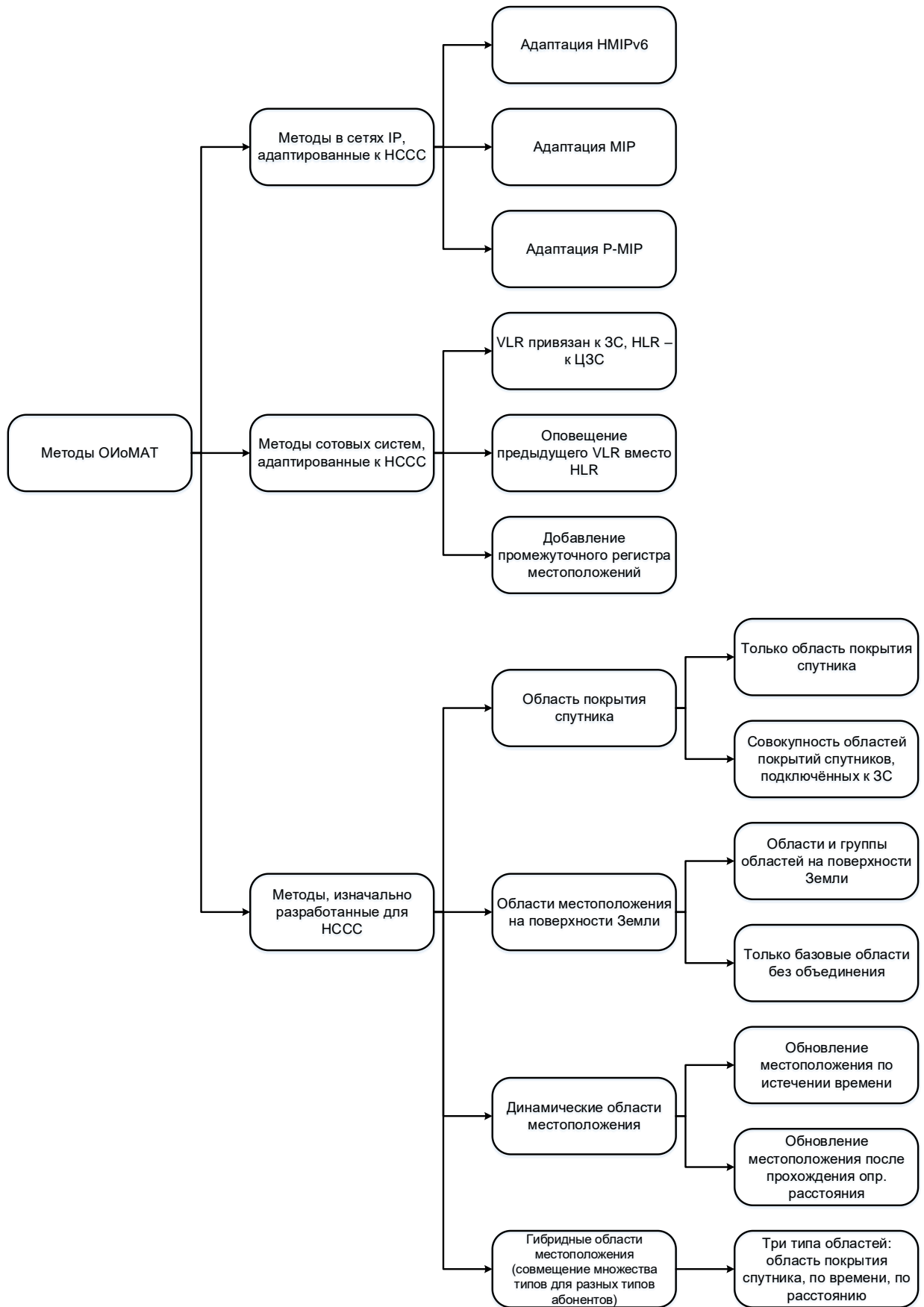


Рисунок 1 – Классификация методов ОIюМАТ

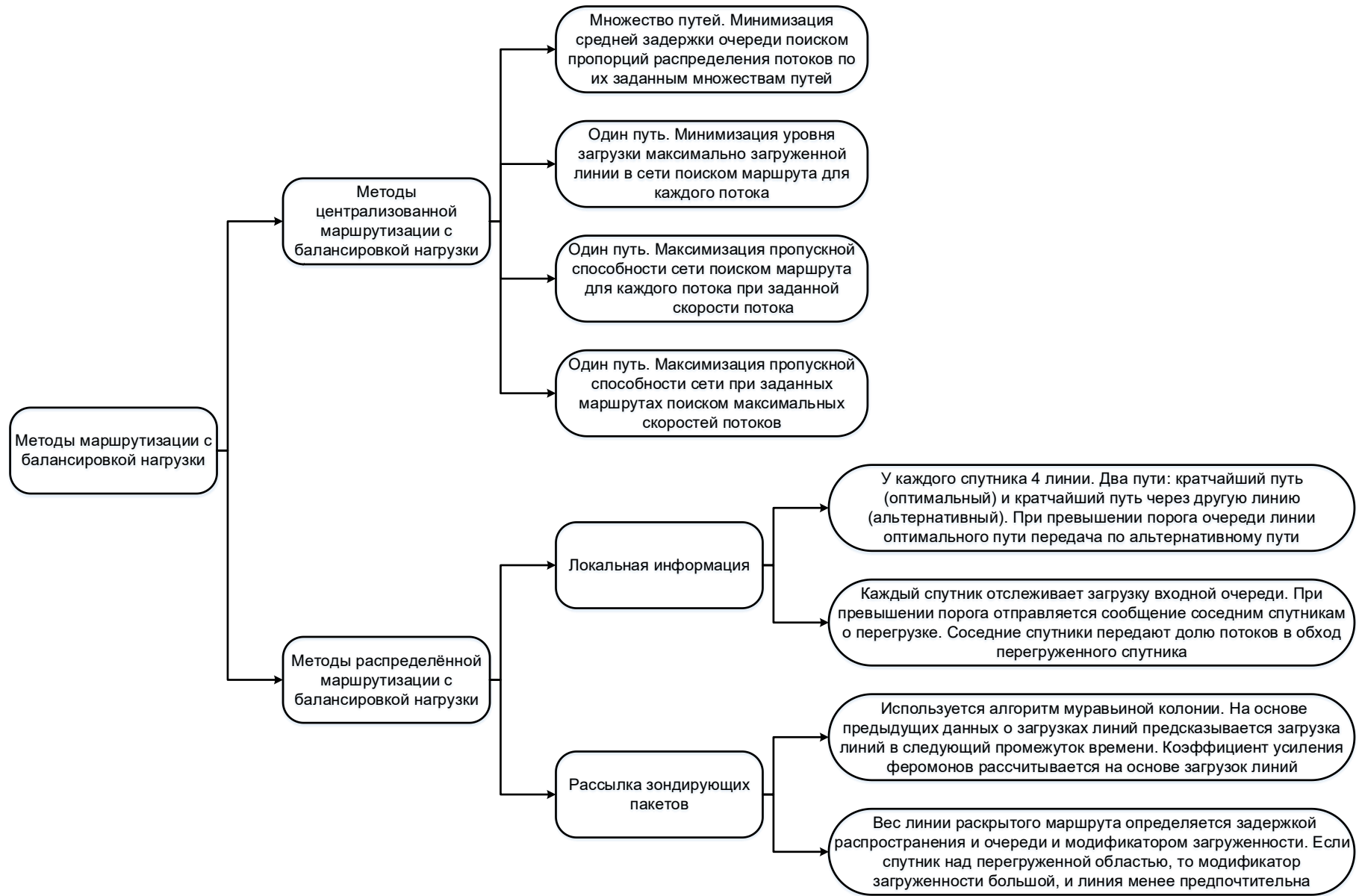


Рисунок 2 – Классификация методов маршрутизации с балансировкой нагрузки



Во **втором разделе** «Метод распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС» предложен метод распределённой обработки информации о местоположении абонентских терминалов в НССС. Предложен способ выбора оптимальных параметров метода. Проведён выбор параметров и моделирование метода. В конце раздела проведено сравнение предложенного метода с другими методами на основе имитационного моделирования.

В предложенном методе обработка производится полностью спутниковой группировкой без обращения к наземному сегменту. Рассматриваемый метод декомпозируется на два частных метода: рассылки информации о новом местоположении абонентского терминала и запроса информации о местоположении. Рассмотрим эти методы.

Местоположением абонентского терминала является спутник, к которому подключён терминал. При переключении новый спутник рассылает информацию о новом местоположении определённой группе спутников, названной группой рассылки (рисунок 3). В эту группу входят следующие спутники:

1. Предыдущий спутник.
2. Новый спутник.
3. Все видимые спутники.
4. Все спутники, находящиеся в пределах  $N$  скачков от видимых спутников.

Информация о местоположении абонентского терминала состоит из следующих полей:

1. Идентификатор терминала.
2. Номер спутника, к которому подключён терминал.
3. Координаты терминала.
4. Время определения местоположения терминала.

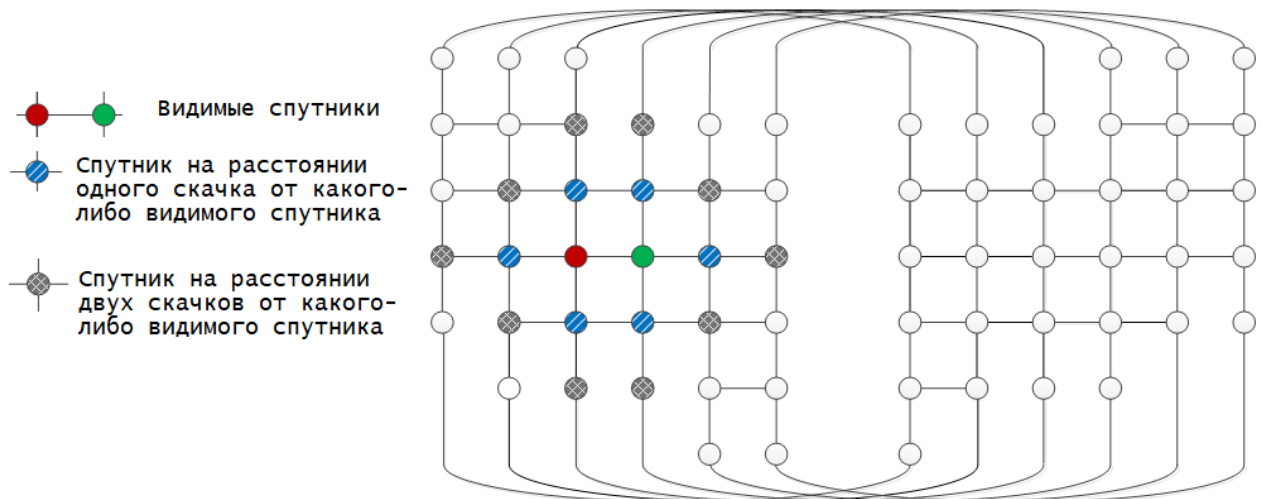


Рисунок 3 – Группа рассылки информации о местоположении абонентского терминала

Меняя значение  $N$  можно изменять размер группы рассылки от только видимых и предыдущего спутника до всех спутников системы. В последнем случае будут рассылаться только пакеты обновления информации о местоположении, пакеты запроса информации и ответа на запрос рассылаться не будут. Это позволяет ограничить количество служебных пакетов в системе при неограниченном росте интенсивности запросов информации о местоположении.

Рассмотрим метод запроса информации о местоположении.

Сначала на спутник поступает запрос на передачу данных определённому терминалу. Спутнику необходимо узнать местоположение терминала-получателя (рисунок 4).

Сначала спутник проверяет, есть ли в его базе данных информация о местоположении терминала. Если нет, то спутник рассылает пакет запроса информации о местоположении всем спутникам системы и ожидает ответа на запрос.

Пакет запроса состоит из следующих полей:

1. Идентификатор спутника, который отправил запрос.
2. Идентификатор терминала, чьё местоположение запрашивается.
3. Древо рассылки.
4. Флаг обязательной рассылки запроса всем спутникам.

Идентификатор спутника нужен для получения ответа. Древо рассылки – это множество маршрутов для многоадресной рассылки запроса всем спутникам. Маршруты рассчитываются по данным альманаха спутниковой системы. Флаг обязательной рассылки нужен для принудительной рассылки запроса всем спутникам. По умолчанию запрос рассылки всем спутникам преобразуется в оправку запроса по старому местоположению, если у спутника получившего запроса есть информация о старом местоположении.

Если информация о местоположении есть, спутник проверяет, доступен ли терминал. Если терминал не доступен, то спутник отправляет ответ о недоступности терминала, передача данных в результате не начинается. Если терминал доступен, то спутник проверяет, действительно ли местоположение. Если местоположение действительно, то спутник разрешает передачу данных терминалу, терминал начинает передавать данные, а спутник пересылает пакеты известному спутнику терминала-получателя.

Если местоположение недействительно, то спутник отправляет запрос по старому местоположению терминала и ожидает ответа на запрос. Время ожидания ответа выбрано равным задержке самого длинного пути, умноженной на 2,5.

Метод рассылки запроса по старому местоположению заключается в следующем. В процессе работы НССС можно собрать много устаревших данных о местоположении абонентских терминалов. Данные о местоположении абонентских терминалов берутся из пакетов обновления местоположения и пакетов ответа на запрос местоположения. Устаревшие местоположения можно либо удалить, либо хранить и затем использовать. Если терминал не перемещался или перемещался относительно медленно, то по координатам из старого местоположения определяются видимые спутники. Новое местоположение рассылается всем видимым спутникам. Поэтому очень вероятно, что терминал находится в области покрытия одного из видимых в точке со старыми координатами спутников. Или этот спутник находится в группе рассылки спутника, к которому подключён терминал.

Принцип действия метода отправки запроса по старому местоположению следующий. Сначала определяется набор видимых спутников. Затем выбирается тот спутник, до которого самый короткий по числу линий путь. Затем создаётся пакет запроса по старому местоположению, и отправляется запрос.

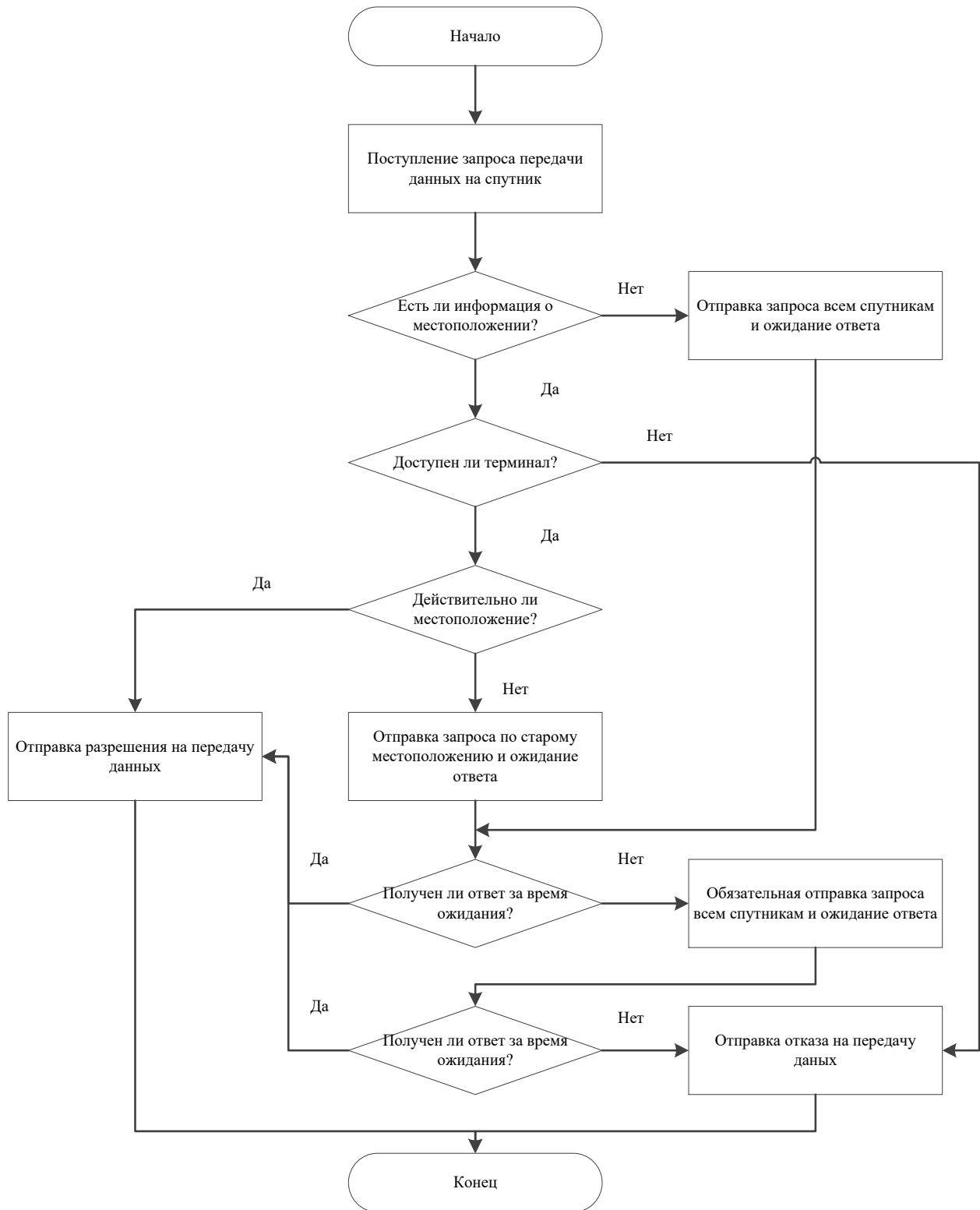


Рисунок 4 – Метод отправки запроса местоположения

В ходе диссертационного исследования проведено имитационное моделирование и сравнение предложенного метода с другими существующими. На рисунке 5 показано сравнение методов по суммарному количеству пакетов, на рисунке 6 показано сравнение методов по средней задержки ответа на запрос информации о местоположении.

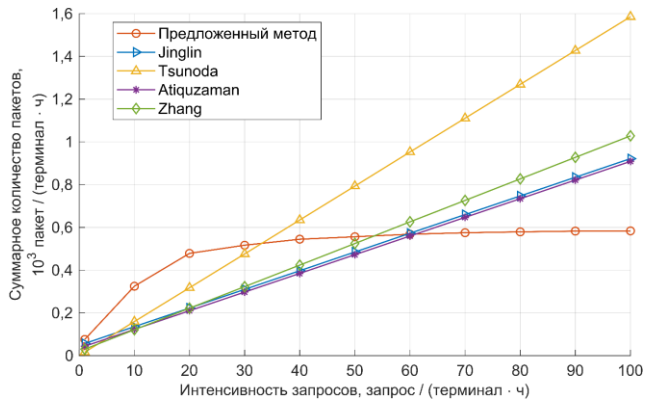


Рисунок 5 – Суммарное количество служебных пакетов

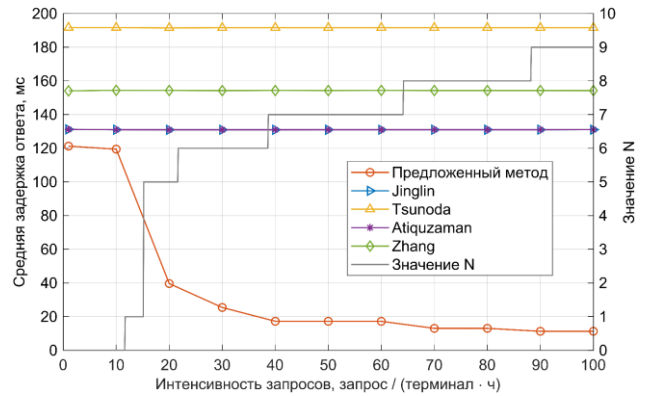


Рисунок 6 – Средняя задержка ответа на запрос местоположения

Из приведённых выше графиков видно, что предложенный метод ограничивает максимальное количество служебных пакетов и обеспечивает в 1,1 – 12 раз меньше среднюю задержку ответа по сравнению с другими существующими методами.

В **третьем разделе** «Метод централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС с межспутниковыми линиями» предложен метод централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС, проведён выбор параметров метода, имитационное моделирование предложенного метода и сравнение с другими существующими.

Задача балансировки нагрузки задана как задача нахождения таких пропорций распределения потоков данных по наборам маршрутов, при которых минимизируется вероятность потери пакетов в НССС. Задача балансировки нагрузки является NP сложной задачей оптимизации поиска пропорций распределения потоков по заданным маршрутам. Поэтому решение находится эвристическими алгоритмами оптимизации.

Предложенный метод централизованной многопутевой маршрутизации состоит из:

- 1) алгоритма нахождения наборов маршрутов между всеми парами спутников;
- 2) алгоритма оптимизации для нахождения таких пропорций распределения потоков данных по маршрутам, которые обеспечивают минимум вероятности потери пакетов.

Предложен алгоритм нахождения наборов маршрутов с минимальным количеством общих линий. Распределение потоков по наборам маршрутов с минимальным количеством общих линий обеспечивает меньшую вероятность потери пакетов.

У алгоритмов эвристической оптимизации есть три основных составляющих:

- 1) функция оценки решения;
- 2) функция случайного создания решения;
- 3) функция случайного изменения решения.

Соответственно предложен:

- 1) алгоритм оценки вероятности потери пакетов в НССС, являющийся функцией оценки решения;
- 2) алгоритм создания случайных пропорций распределения потоков данных по наборам маршрутов, на основе которого созданы функция случайного создания решения и функция случайного изменения решения.

Выбран генетический алгоритм эвристической оптимизации для решения задачи балансировки нагрузки и подобраны его параметры.

Рассмотрим подробнее предложенный метод. Пересчёт таблиц маршрутизации происходит один раз в период времени, названный периодом балансировки нагрузки. Последовательность действий метода за один период балансировки следующая.

1. Каждый спутник системы является одновременно источником потоков данных по отношению к другим спутникам системы (данные изначально поступают от абонентских терминалов в области покрытия спутника) и получателем потоков данных от других спутников (данные в конечном счёте поступают к абонентским терминалам в области покрытия спутника). Потоки данных от абонентских терминалов объединяются в один общий поток, если у этих потоков одинаковый спутник-отправитель и спутник-получатель. Каждый спутник измеряет объём общего потока, источником которого является, за период балансировки нагрузки  $T$ . Значение  $T$  должно быть относительно небольшим, чтобы в следующем периоде балансировки нагрузки объём потоков данных не сильно отличался от предыдущего периода.
2. В конце периода балансировки нагрузки каждый спутник отправляет измеренные объёмы потоков данных на ЦЗС.
3. Для каждой топологии в следующем периоде балансировки нагрузки ЦЗС:
  - 3.1. Определяет пропорции распределения потоков данных по заранее рассчитанным маршрутам. Маршруты могут быть рассчитаны заранее, так как топология спутниковой системы предсказуема.
  - 3.2. ЦЗС из наборов маршрутов и пропорций распределения составляет таблицы маршрутизации для каждого спутника.
4. ЦЗС отправляет спутникам таблицы маршрутизации на следующий период балансировки нагрузки.

На третьем шаге решается непосредственно сама задача балансировки нагрузки. Балансировка нагрузки является задачей оптимизации, состоящей в следующем.

Дана НССС. Спутниковая система представлена в виде графа  $G = (S, L, C, V)$ , где  $S$  – множество спутников,  $L$  – множество линий,  $C$  – ёмкость линий,  $V$  – объём выходного буфера для каждой линии. В спутниковой системе используется многопутевая маршрутизация. Между всеми парами спутников даны наборы маршрутов  $M$  и значения объёмов потоков данных  $F$  за период балансировки нагрузки. Цель балансировки нагрузки найти такие пропорции распределения  $R$  потоков данных из множества  $F$  по наборам маршрутов из множества  $M$ , при которых минимизируется вероятность потери  $P$  пакетов при переполнении буфера линии в НССС.

Продолжим задание задачи балансировки нагрузки. Пусть  $m_{ij}$  – множество маршрутов от спутника  $i$  к спутнику  $j$ .  $M_i$  – множество маршрутов от спутника  $i$  ко всем остальным спутникам. Пусть  $M$  – множество всех маршрутов. Соотношение между множествами следующее:

$$m_{ij} \subset M_i \subset M, \quad i, j \in S.$$

Зададим вектор пропорций  $r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ij|m_{ij}|})$ ,  $\sum_{r_{ijk} \in r_{ij}} r_{ijk} = 1$ , где  $|m_{ij}|$  – число маршрутов в  $m_{ij}$ . Вектор пропорций  $r_{ij}$  определяет распределение потока данных  $f_{ij}$  по множеству маршрутов  $m_{ij}$ . Поток данных разделяется на совокупность потоков данных, идущих по разным маршрутам. Сумма объёмов  $\sum \lambda_{f_{ijk}}$  отдельных потоков данных за  $T$ , идущих по разным маршрутам, равна объёму потока данных  $\lambda_{f_{ij}}$  за  $T$ ; объём отдельных потоков данных пропорционален коэффициенту пропорциональности из вектора пропорций  $\lambda_{f_{ijk}} = \lambda_{f_{ij}} r_{ijk}$ :

$$\lambda_{f_{ij}} = \sum \lambda_{f_{ijk}} = \sum \lambda_{f_{ij}} r_{ijk}.$$

Для пропорций зададим аналогичные множества, что и для маршрутов.

$$r_{ij} \subset R_i \subset R, \quad i, j \in S.$$

Задача балансировки нагрузки – это задача оптимизации, которая задаётся следующим образом:

Минимизировать целевую функцию при заданных  $G, M, F$ :

$$\min_R P = U(G, M, F, R).$$

Рассмотрим алгоритм поиска наборов маршрутов  $M$ .

Для одной пары спутников набор маршрутов находится следующим образом. Сначала находится исходное множество маршрутов. Линии этого множества проходят по всем линиям спутниковой системы. Затем из исходного множества находится подмножество максимально разрозненных маршрутов.

Подмножество максимально разрозненных маршрутов находится на основе двух метрик, предложенных в диссертации, с помощью алгоритма оптимизации.

Две метрики заключаются в следующем.

Пусть дан граф спутниковой системы  $G = (S, L)$ , где  $S$  – множество спутников,  $L$  – множество линий. Пусть дан набор из  $N$  путей, обозначим его  $Q$ . Путь  $q_i$  в наборе  $Q$  представлен в виде вектора из 0 и 1, где 0 соответствует тому, что путь не проходит через соответствующую линию спутниковой системы, а 1 – наоборот. Длина вектора  $q_i$  равна количеству линий в спутниковой системе

$$Q = \{q_i\}_1^N, |Q| = N, q_i = \{0, 0, 1, \dots, 0, 1, 0, 1\}, |q_i| = |L|.$$

Для каждой линии определим количество путей, которые проходят через неё. Представим результаты определения количества путей в виде множества  $E$

$$f(Q) = \left\{ \sum_{q_i \in Q, x_1 \in q_i, i=1}^{i=|Q|} x_1, \sum_{q_i \in Q, x_2 \in q_i, i=1}^{i=|Q|} x_2, \dots, \sum_{q_i \in Q, x_{|q_i|} \in q_i, i=1}^{i=|Q|} x_{|q_i|} \right\},$$

$$E = f(Q).$$

Сумму элементов множества  $E$  назовем степенью загрузки линий спутниковой системы  $X$

$$X = \sum_{x \in E} x.$$

Чем длиннее пути из набора  $Q$ , тем через большее количество линий они проходят, отсюда один и тот же поток данных загрузит большее количество линий, чем при использовании более коротких маршрутов. Чем меньше значение параметра степени загрузки линий  $X$ , тем меньше нагрузка на спутниковую систему.

Из каждого элемента множества  $E$ , который больше 0, вычтем 1. Просуммируем все элементы и получим оценку того, насколько разрознены пути в наборе. Назовём эту оценку степенью разрозненности набора путей  $Y$ :

$$f(x) = x - 1,$$

$$\Lambda = \{f(x) | x \in E \wedge x > 0\},$$

$$Y = \sum_{z \in \Lambda} z.$$

Степень разрозненности  $Y$  означает следующее. Пусть даны два набора по пять путей, каждый из которых проходит через три линии. В первом наборе все маршруты

проходят через разные линии, т.е. ни у одной пары маршрутов нет общих линий. Во втором наборе все маршруты проходят через одни и те же линии, т.е. полностью совпадают. Степень загрузки линий  $X$  у обоих маршрутов равна 15. Степень разрозненности  $Y$  у первого набора равна 0, т.к. через каждую линию проходит не больше одного маршрута, а второго набора равна 12, т.к. через три линии проходят все 5 маршрутов. Таким образом, чем меньше значение параметра степени разрозненности  $Y$  набора маршрутов, тем меньше у маршрутов общих линий.

Оценка набора маршрутов сводится к вычислению двух параметров:  $X$  и  $Y$ . Набор маршрутов  $A$  лучше набора  $B$  в том случае, если  $Y_A < Y_B$ . Если значения  $Y$  равны, то лучшим будет тот набор, у которого значение  $X$  наименьшее. В этом случае мы получаем такой же разрозненный набор, но с более короткими маршрутами.

В качестве алгоритма оптимизации для поиска набора максимально разрозненных маршрутов в диссертации выбран алгоритм имитации отжига.

Рассмотрим функцию случайного создания и изменения решения. Отметим, что функция случайного создания и функция случайного изменения решения в данном случае не является функцией в математическом смысле, а является алгоритмом, поскольку в теории оптимизации обычно используется термин функция вне зависимости от того, является ли функция функцией, а не алгоритмом.

Требуется задать случайные пропорции распределения  $r_{ij}$  потока данных  $f_{ij}$  по набору маршрутов  $m_{ij}$  для всех пар спутников  $ij$ .

Используется предположение, что чем короче маршрут, тем меньше линий загружает поток данных, идущий по нему, значит другие потоки могут использовать свободную пропускную способность линий. Поэтому пропорции распределения потока данных должны быть такими, чтобы чем короче маршрут, тем большая доля потока данных направлялась бы по этому маршруту. Для того, чтобы создать пропорции распределения подобным образом, удобно воспользоваться экспоненциальной функцией  $y = e^{\lambda x}$ .

Последовательность определения пропорций распределения потока данных по  $N$  маршрутам на основе экспоненциальной функции следующая.

1. Зададимся минимальным и максимальным значением  $x_{min} = 1$  и  $x_{max} = 2N$ , где  $N$  – количество маршрутов в наборе маршрутов.
2. Выберем с равномерным распределением случайное значение  $\lambda$  в диапазоне  $[0,1]$ .
3. Осуществим равномерную дискретизацию на отрезке  $[x_{min}, x_{max}]$  непрерывных значений экспоненциальной функции  $y = e^{\lambda x}$  с выбранным на предыдущем шаге значением  $\lambda$  таким образом, чтобы получить  $N + 1$  значений  $y$  и чтобы были получены значения функции в  $x_{min}$  и  $x_{max}$ .
4. Проведём нормировку значений  $y$  по формуле  $y = (y - y_{min}) / (y_{max} - y_{min})$ .
5. На основе множества чисел  $y$  получаем множество чисел  $r = \{y_2 - y_1, y_3 - y_2, y_4 - y_3, \dots, y_{N+1} - y_N\}$ . Множество  $r$  состоит из  $N$  экспоненциально возрастающих чисел больше 0, сумма которых равна 1. Эти числа используем в качестве пропорций распределения потока данных по  $N$  маршрутам. Маршруты сортируются по убыванию длины. Первое наименьшее значение из  $r$  соответствует длиннейшему маршруту, последнее наибольшее – кратчайшему маршруту.

Случайно изменяя параметр  $\lambda$ , можно случайно получать распределение потока данных по маршрутам от равномерного ( $\lambda = 0$ ) до такого, где практически весь объем потоков данных принадлежит кратчайшему маршруту. На рисунке 7 изображены пропорции распределения для 8 маршрутов с разными значениями  $\lambda$ .

Тем не менее, с помощью вышеописанного способа (способа с экспоненциальным распределением по маршрутам) почти невозможно получить распределение с направлением потока данных только по кратчайшему пути.

Чтобы добиться направления потока только по кратчайшему пути, с небольшой вероятностью будем выбирать равномерное распределение по маршрутам и распределение по кратчайшему пути.

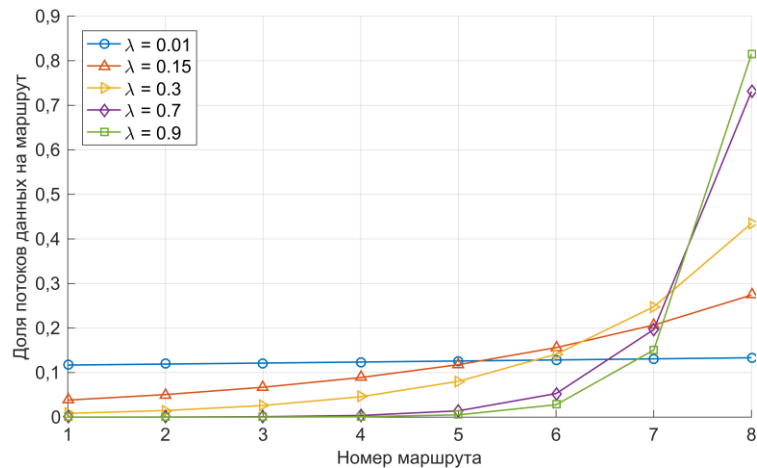


Рисунок 7 – Пропорции распределения потоков данных по маршрутам

Теперь опишем способ получения пропорций распределения потока, не зависящий от длин маршрутов. Для этого берём пропорции распределения, полученные на основе экспоненциального распределения, и случайно перераспределяем значения пропорций между маршрутами.

Таким образом, для создания случайных пропорций распределения по маршрутам для одного набора маршрутов случайно выбираем одно из 3-х распределений со следующими вероятностями.

1. Все потоки данных по кратчайшему пути с вероятностью 0,01.
2. Экспоненциальное распределение с вероятностью 0,49.
3. Случайно перемешанные пропорции на основе экспоненциального распределения с вероятностью 0,5.

Вероятности выбраны опытным путём с целью достижения сходимости алгоритма эвристической оптимизации; значения вероятностей могут не быть оптимальными.

Функцией создания случайного решения является расчёт пропорции распределения вышеописанным способом для всех наборов маршрутов  $m_{ij}$ ; в результате получается случайное решение  $R = \{r_{ij}\}$ . Функцией случайного изменения решения является перерасчёт пропорций одного случайно выбранного множества  $r_{ij}$  описанным выше способом.

Рассмотрим функцию оценки решения. Функция оценки решения оценивает вероятность потери пакетов из-за переполнения буферов линий НССС. Предполагается, что используются выходные буферы линий. Для оценки вероятности потери пакетов дано следующее.



1. Граф спутниковой системы  $G = (S, L, C, V)$ , где  $S$  – множество спутников,  $L$  – множество линий,  $C$  – скорость передачи (пропускная способность) для каждой линии,  $V$  – объем буфера для каждой линии.
2. Множество объемов потоков данных за период балансировки нагрузки в спутниковой системе  $F = \{f_{ij}\}, i, j \in S$ .  $f_{ij}$  – объем потока данных от спутника  $i$  к спутнику  $j$  за период балансировки нагрузки.
3. Наборы маршрутов между каждой парой спутников в системе  $M = \{m_{ij}\}$ .
4. Значение периода балансировки нагрузки  $T$ .
5. Вектор пропорций распределения потоков данных между всеми парами спутников  $R = (r_{ij}, \dots, r_{kl}, \dots, r_{mn})$ .

Функция оценки решения основана на следующем алгоритме.

1. Разбиваем каждый поток  $f_{ij}$  на множество подпотоков, каждый из которых идет по маршруту  $m_{ijk} \in m_{ij} \subset M$ . Определяем объемы подпотоков, которые равны  $f_{ijk} = r_{ijk}f_{ij}$ , где  $r_{ijk} \in r_{ij} \subset R$ . Определяем суммарный объем потоков данных, равный сумме объемов потоков между всеми парами спутников  $F_{\Sigma} = \sum f_{ij}$ .
2. Создаем множество  $N$ . В этом множестве для каждой линии из  $L$  содержится список подпотоков, проходящих через соответствующую линию из  $L$ . Чтобы получить множество  $N$ , для каждого подпотока  $f_{ijk}$  проходим по его маршруту  $m_{ijk}$  и добавляем к информации о соответствующей линии номер нового потока.
3. За период балансировки нагрузки  $T$  через линию  $i$  может пройти объем потоков равный  $C_i T$ , где  $C_i$  – скорость передачи линии  $i$ , а в буфере линии может накопиться объем потоков, равный  $V_i$ . Если объем пришедших потоков  $I_i$  будет больше  $C_i T + V_i$ , то будет потерян объем потоков  $W_i = I_i - (C_i T + V_i)$ .
4. Определим линии, для которых  $W_i > 0$ . Соберем эти линии в множество  $O$ . Если множество  $O$  пусто, то вероятность потери пакетов  $P = 0$ . Завершаем работу алгоритма. Иначе переходим к следующему шагу.
5. В множестве  $O$  определяем линию с наибольшим  $W_i$ , т.е. самую перегруженную линию.
6. Для этой линии определим, во сколько раз нужно уменьшить интенсивность подпотоков, проходящих через неё, чтобы не происходило потерь. Это значение равно  $K_i = (C_i I_i + V_i) / I_i$ .
7. Возьмем все подпотоки, проходящие через эту линию, и умножим их объемы на  $K_i$ .
8. Удалим самую перегруженную линию из множества перегруженных линий  $O$ .
9. Пересчитываем  $W_i$  для всех членов  $O$ . Если  $W_i \leq 0$ , то удаляем линию из множества  $O$ .
10. Если множество  $O$  непустое, то возвращаемся к шагу 5. Если пустое, то переходим к шагу 11.
11. Определяем заново суммарный объем потоков, равный сумме подпотоков с уменьшенными значениями их объемов  $F'_{\Sigma} = \sum f'_{ij}$ .
12. Оценка вероятности потери пакетов равна  $P = (F_{\Sigma} - F'_{\Sigma}) / F_{\Sigma}$ .

Таким образом, мы сначала оцениваем, какой суммарный объем потоков может пройти по спутниковой системе без потерь  $F'_{\Sigma}$ . Затем  $F'_{\Sigma}$  отнимаем от суммарного значения объема потоков, который должен пройти по спутниковой системе  $F_{\Sigma}$ , получая оценку

объёма потерянных потоков. Затем эту оценку делим на  $F_{\Sigma}$ , получая оценку вероятности потери пакетов  $P$ .

В качестве алгоритма оптимизации для поиска пропорций распределения потоков данных по множествам маршрутов, минимизирующей вероятность потери пакетов в спутниковой системе, в диссертации выбран генетический алгоритм и подобраны его параметры.

Параметры генетического алгоритма следующие.

1. Особь – это вектор пропорций распределения потоков данных между всеми парами спутников  $\mathbf{R} = (r_{ij}, \dots, r_{kl}, \dots, r_{mn})$ .
2. Длина хромосомы –  $66 \cdot 65 = 4290$  генов.
3. Размер популяции, особей – 40.
4. Количество поколений – 100.
5. Стратегия элитизма (отбираются только элитные с точки зрения оценки вероятности потери пакетов особи).
6. Доля элитных особей – 0,15.
7. Одноточечный кроссовер (одна точка скрещивания). Точка кроссовера выбирается случайно с равномерным распределением.
8. Вероятность кроссовера – 0,85.
9. Вероятность мутации (одинаковая для всех генов) – 0,05.

В ходе диссертационного исследования проведено имитационное моделирование и сравнение предложенного метода с другими существующими. На рисунке 8 представлено сравнение по вероятности потери пакетов. На рисунке 9 представлено сравнение по пропускной способности.

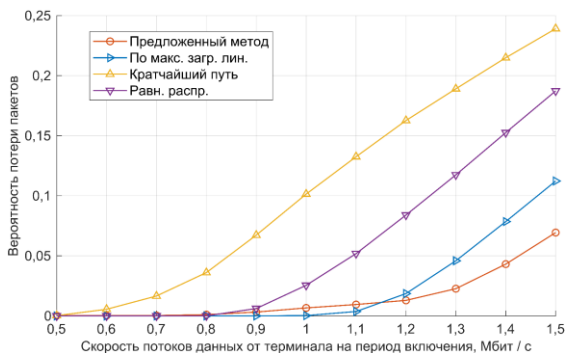


Рисунок 8 – Вероятность потери пакетов

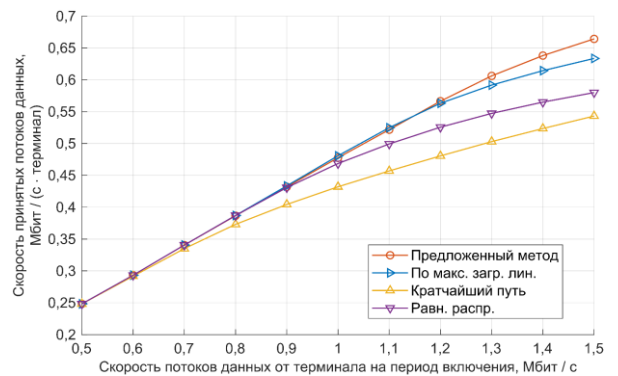


Рисунок 9 – Пропускная способность

Из приведённых графиков видно, что предложенный метод обеспечивает в 1,7 раз меньше вероятность потери пакетов и на 6% больше пропускную способность по сравнению с другими методами.

В четвёртом разделе «Метод распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС» предложен метод распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС. Приведено описание метода и предложен метод выбора его параметров. Проведено имитационное моделирование метода и сравнение предложенного метода с другими существующими.

В предложенном методе каждый спутник периодически рассылает в течение периода балансировки нагрузки  $T$  служебные пакеты. Служебные пакеты случайно пересылаются, пока не доходят до получателя. Затем пакеты отправляются обратно. После того, как пакеты возвращаются, спутники определяют по информации, содержащейся в пакетах маршруты и пропорции распределения потоков данных по ним (рисунок 10).

Каждый спутник периодически через время  $t_p < T$  рассылает служебные пакеты для поиска маршрутов не ко всем, а только к тем спутникам, к которым передавались данные за некоторое количество последних периодов балансировки нагрузки. Пакет пересылается не больше, чем  $N_{max}$  скачков.

Служебный пакет состоит из следующих полей.

1. Идентификатор спутника-источника.
2. Идентификатор спутника-получателя.
3. Вектор с последовательностью спутников в маршруте пакета  $M$ .
4. Вектор с вероятностями ошибок всех пройденных пакетом линий  $P$ .
5. Вектор с задержками всех пройденных пакетов линий  $D$ .

В конце периода балансировки нагрузки среди накопленных маршрутов отбираются маршруты с задержкой меньше или равной следующей:

$$b = d_{min} + (d_{max} - d_{min})a, \text{ где } a \in [0,1],$$

$d_{min}$  – наименьшая задержка,  $d_{max}$  – наибольшая задержка.

Пропорции распределения потока данных по маршрутам определяются на основе равенства скоростей потерь:

$$p_1 r_1 R = \dots = p_i r_i R = p_{i+1} r_{i+1} R = \dots = p_k r_k R,$$

где  $p_i$  – вероятность потери пакета на маршруте  $i$ ,  $R$  – скорость потока данных,  $r_i$  – доля потока данных, проходящая по маршруту  $i$ .

Отобранные маршруты удаляются либо по истечении определённого времени последнего обнаружения, либо при отключении линии маршрута (топология НССС предсказуема).

В ходе диссертационного исследования проведено имитационное моделирование и сравнение предложенного метода с другими существующими. На рисунке 11 приведено сравнение по вероятности потери пакетов, на рисунке 12 – по пропускной способности.

Из приведённых графиков видно, что предложенный метод обеспечивает в 1,5 раза меньше вероятность потери пакетов и обеспечивает на 12% больше пропускную способность по сравнению с другими методами.

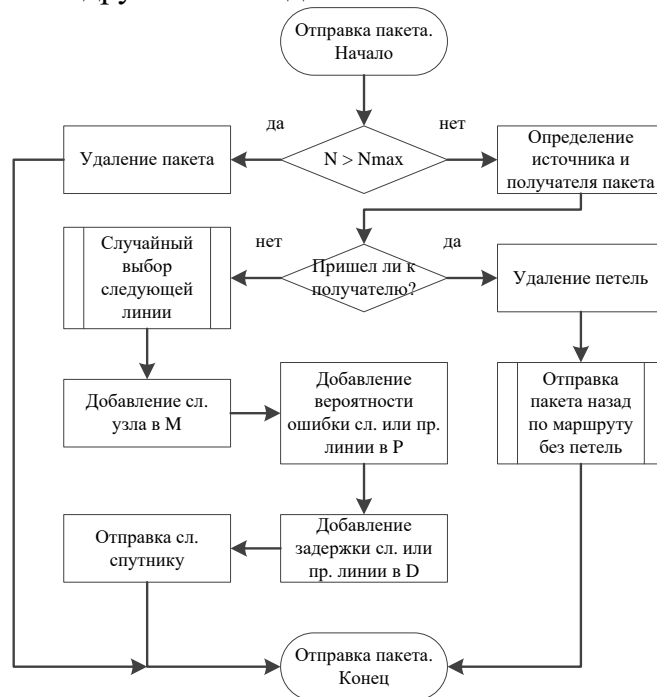


Рисунок 10 – Алгоритм отправки служебного пакета для раскрытия маршрута

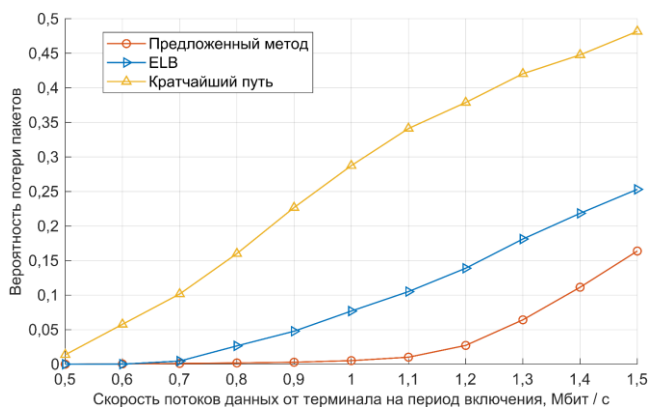


Рисунок 11 – Вероятность потери пакетов

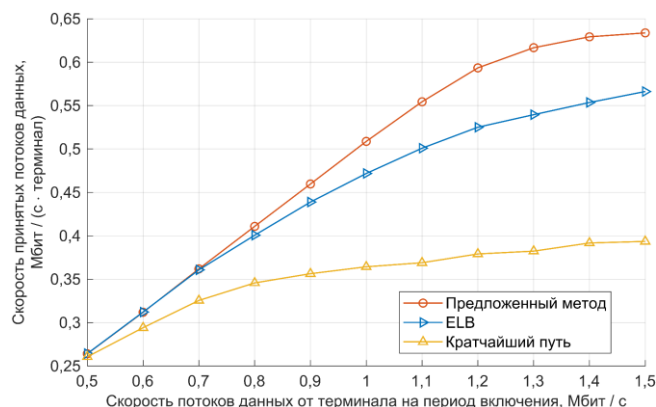


Рисунок 12 – Пропускная способность

В заключении сформулированы основные результаты диссертации. Основные результаты диссертационной работы сведены к следующему.

1. Разработан метод распределённой обработки информации о местоположении абонентов в низкоорбитальных спутниковых системах связи (НССС). В этом методе, в отличие от других существующих, база данных местоположений абонентов хранится распределённо на спутниках. Для получения неизвестной информации о местоположении спутник отправляет запрос местоположения другим спутникам. Проведено имитационное моделирование предложенного метода и сравнение с другими существующими методами. Результаты имитационного моделирования показали, что предложенный метод обеспечивает меньшую задержку ответа на запрос местоположения абонентского терминала по сравнению с другими рассмотренными методами.

2. Разработан новый метод централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС. Задача централизованной балансировки нагрузки сводится к задаче оптимизации определённого параметра производительности системы связи. Основное отличие созданного метода от существующих в том, что в качестве параметра производительности используется вероятность потери пакетов в целом по спутниковой системе. Специально создан алгоритм для оценки вероятности потери пакетов в целом по спутниковой системе. Проведено имитационное моделирование метода, которое показало, что разработанный метод обеспечивает низкую вероятность потери пакетов, низкую задержку очереди и высокую пропускную способность НССС по сравнению с другими рассмотренными методами.

3. Разработан новый метод распределённой многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в НССС. Проведено имитационное моделирование метода и сравнение с другими методами. Моделирование показало, что разработанный метод обеспечивает низкую вероятность потери пакетов, низкую задержку очереди и высокую пропускную способность НССС по сравнению с другими рассмотренными методами.

Таким образом, цель диссертационной работы достигнута, научная задача разработки новых, более эффективных методов обработки информации о местоположении абонентских терминалов и маршрутизации в НССС решена.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в научных журналах, включенных ВАК в список изданий, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертации:**

1. Иванов, В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями / В.И. Иванов // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 69-105.
2. Иванов, В.И. Точность определения местоположения в децентрализованной многопозиционной радиолокационной системе / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10. – № 10. – С. 56-59.
3. Иванов, В.И. Метод распределённого управления балансировкой нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе связи / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – № 12. – С. 67-71.
4. Иванов, В.И. Метод распределенного управления информацией о местоположении абонентов низкоорбитальной спутниковой системы / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8. – № 4. С. 33-37.
5. Иванов, В.И. Централизованный метод балансировки нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8. – № 4. – С. 38-42.
6. Иванов, В.И. Метод инженерного расчета областей совместного покрытия спутниковой системы / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7. – № 11. – С. 88-92.
7. Иванов, В.И. Протокол управления децентрализованной базой данных местоположения абонентских терминалов в негеостационарных спутниковых системах / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7. – № 11. – С. 93-96.
8. Иванов, В.И. Исследование протоколов маршрутизации в негеостационарных спутниковых системах / В.И. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 6. – С. 19-21.

### **Публикации в других изданиях:**

9. Иванов, В.И. Метод централизованного управления балансировкой нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе связи / В.И. Иванов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 1074-1077.
10. Иванов, В.И. Точность определения местоположения в многопозиционной радиолокационной системе дальномерным методом / В.И. Иванов // Технологии информационного общества: материалы X Международной отраслевой научно-технической конференции / М.: ИД Медиа Паблицер. – 2016. – С. 126-127.
11. Иванов, В.И. Метод расчета набора путей с минимальным количеством общих линий / В.И. Иванов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием / М.: РУДН. – 2014. – С. 94-96.
12. Иванов, В.И. Распределенное управление информацией о местоположении абонентов низкоорбитальной спутниковой системы / В.И. Иванов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование

высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием / М.: РУДН. – 2014. – С. 97-100.

**Авторские свидетельства:**

13. Акимов, А.А. Утилита моделирования многолучевых диаграмм направленности / А.А. Акимов, В.И. Иванов, Л.В. Курахтенков // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2016660029 18.07.2016.



Подписано в печать 18.17.2020  
Формат 29,7x42/8. Цифровая печать  
Печ.л. 3, тираж 100 экз. Заказ 125

Оперативная полиграфия «Брис-М»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8  
[www.брис-м.рф](http://www.брис-м.рф)