

Иванушкин Максим Александрович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ С УЧЁТОМ
ВЫБОРА КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ ПРИЁМА ИНФОРМАЦИИ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова.

Научный руководитель:

Салмин Вадим Викторович, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова, директор НИИ космического машиностроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Официальные оппоненты:

Клюшников Валерий Юрьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный учёный секретарь АО «ЦНИИмаш»;

Малышев Вениамин Васильевич, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра 604 «Системный анализ и управление», профессор.

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита диссертации состоится 5 июня 2026 в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.09, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д.34.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/resources/dis_protection/ivanushkin.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

С.В. Востокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие современных многоспутниковых космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) характеризуется существенным увеличением количества космических аппаратов (КА) на орбите и возрастающими требованиями к оперативности и периодичности получаемых данных. В настоящее время ведущие космические державы и частные компании активно развёртывают многочисленные группировки малых космических аппаратов, способных обеспечивать глобальное покрытие земной поверхности с высокой периодичностью наблюдения. По данным аналитических агентств, в 2024 году было успешно запущено около 300 КА ДЗЗ (Bryce Space and Technology Report), а суммарное количество спутников ДЗЗ на орбите превысило 1000 единиц. В период с 2024 по 2034 ожидается запуск более 5400 КА ДЗЗ, что в 2,8 раз больше, чем в прошлое десятилетие.

Однако эффективность функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ определяется не только орбитальной группировкой, но и наземной инфраструктурой, обеспечивающей получение, обработку и распространение данных. Фактически, при существующих темпах роста количества спутников наблюдается явный дисбаланс между возможностями орбитальной группировки по сбору информации и возможностями наземной инфраструктуры по её приёму и обработке.

Особую актуальность приобретает задача повышения целевой эффективности функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли в контексте роста стратегического значения Арктического региона для Российской Федерации в связи с развитием Северного морского пути, освоением природных ресурсов и изменением климата. Эффективный мониторинг ледовой обстановки и навигационных условий в Арктике является критически важным для обеспечения безопасности судоходства и экономического развития региона.

Существующие методики синтеза космических систем ДЗЗ традиционно фокусируются на оптимизации орбитальной группировки, в то время как вопросы оптимального размещения наземных станций приёма информации необходимых для оперативного получения данных о стратегически важных регионах, в том числе таких как Арктика, остаются недостаточно проработанными.

В этих условиях разработка методики оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, учитывающих взаимодействие орбитальной группировки и наземной инфраструктуры, представляется **актуальной научно-технической задачей**, решение которой позволит обеспечить разработку перспективных космических систем наблюдения с повышенными показателям периодичности наблюдения и оперативности доставки целевой информации на наземные пункты приёма.

Степень разработанности темы исследования

Методы анализа и синтеза космических систем наблюдения наиболее полно изложены А.А. Лебедевым, В.В. Малышевым, Г.З. Давлетшиным, Ф.Р. Ханцеверовым, Б.С. Скребушевским и др. Также следует отметить теоретические и прикладные результаты в области проектирования космических систем мониторинга Д.И. Козлова, Г.П. Аншакова, Р.Н. Ахметова, А.В. Соллогуба. Методы орбитального построения кинематически правильных спутниковых систем глобального обзора наиболее полно изложены в работах Г.В. Можаяева, J. Walker, Б.Р. Быркова, L. Rider,

W. Adams, T.Lang, В.К. Саульского, Ю.П. Улыбышева. Задача распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем дистанционного зондирования Земли решалась А.А. Емельяновым, А.В. Старковым. В работах В.Ю. Ключникова, А.В. Соллогуба, А.Ю. Потюпкина, В.В. Бетанова, В.В. Широкова рассматривались вопросы управления многоспутниковыми группировкам. Вопросам повышения эффективности информационного обмена между наземным и космическим сегментом путем использования межспутниковых линий связи посвящены работы О.В. Карсаева, Е. Ekici, S. Burleigh.

В большинстве существующих работ орбитальная группировка и наземная инфраструктура рассматриваются как отдельные системы, оптимизируемые по независимым критериям, без учёта их взаимного влияния на комплексную эффективность функционирования системы. Методы орбитального проектирования группировок, как правило, ориентированы на обеспечение заданных характеристик наблюдения территорий без детального учёта ограничений наземного сегмента по пропускной способности каналов связи, возможностям одновременного обслуживания множества космических аппаратов и географическому размещению пунктов приёма информации. Существующие исследования в области организации информационного обмена между орбитальными группировками и наземным сегментом преимущественно концентрируются на оптимизации использования уже развёрнутой инфраструктуры. Однако для перспективных многоспутниковых группировок такой разрозненный подход приводит к недоиспользованию ресурсов космического сегмента из-за недостаточной пропускной способности наземных средств, увеличению временных задержек в доставке целевой информации потребителям, снижению общей производительности системы.

Недостаточная проработанность вопросов комплексной оценки показателей функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ с учётом взаимодействия орбитальной и наземной составляющих определяет необходимость проведения данного исследования.

Объектом исследования является многоспутниковая космическая система, включающая орбитальную группировку и наземные станции приёма.

Предмет исследования

Показатели функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли.

Цель работы

Повышение целевой эффективности функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли.

Задачи работы

1. Разработка методики выбора оптимального расположения наземных станций приёма информации необходимых для низкоорбитальной многоспутниковой группировки с учётом динамики орбитального движения и информационных потоков, формируемых космической системой.

2. Разработка масштабируемой имитационной модели для оценки ключевых показателей функционирования космических систем ДЗЗ, включающих низкоорбитальные многоспутниковые группировки и наземные станции приема, учитывающую параметры орбитальной группировки, характеристики полезной нагрузки, параметры наземной инфраструктуры и информационного взаимодействия между элементами системы.

3. Разработка программного комплекса для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем, позволяющего проводить многовариантные исследования эффективности функционирования данных систем.

4. Апробация разработанной методики и программного комплекса на примере решения двух практических задач по оценке целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, обеспечивающих глобальный высокодетальный мониторинг земной поверхности, а также космических систем, предназначенных для мониторинга Арктики и Северного морского пути.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок, отличающаяся тем, что выбор координат размещения станций осуществляется жадным алгоритмом с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата.

2. Разработана масштабируемая агрегированная имитационная модель для оценки ключевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, позволяющая анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций, отличающаяся тем, что моделируется работа целевой аппаратуры наблюдения с расчётом объёма генерируемых данных, состояние бортовой памяти космических аппаратов рассчитывается интегрированием скоростей поступления данных от целевой аппаратуры и передачи на наземные станции, а сеансы связи моделируются с использованием очередей передачи данных, упорядоченных по времени съёмки.

3. Разработана методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек, отличающаяся тем, что для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик (средняя, минимальная и максимальная периодичность наблюдения, коэффициент вариации периодичности, время доставки информации на наземную станцию), что позволяет получать количественные оценки процента покрытия заданного региона, периодичности наблюдения и оперативности доставки информации в зависимости от варьируемых параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и расположения наземных станций приёма.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в разработке масштабируемой агрегированной математической модели, сочетающей имитационное моделирование орбитального сегмента космической системы наблюдения, модель информационных потоков с учетом характеристик съёмочной аппаратуры, бортового запоминающего устройства и высокоскоростной радиолинии космических аппаратов, а также моделирование информационного взаимодействия с наземными пунктами приёма информации с оптимизацией их расположения.

Практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной методики, модели и программного комплекса для решения задач

проектирования и оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли как на ранних стадиях разработки, так и на стадии эксплуатации. Разработанный инструментарий использован для решения двух практических задач: определения оптимальных параметров космической системы квазинепрерывного глобального обзора с обоснованием количества космических аппаратов, параметров орбит и расположения наземных пунктов приёма информации, а также для выбора архитектуры радиолокационной космической системы мониторинга Арктического региона с обоснованием комбинированной схемы построения орбитальной группировки, обеспечивающей требуемые показатели покрытия и периодичности наблюдения.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы системного анализа, теории оптимального управления, математического моделирования, оптимизации, теории орбитального движения, теории массового обслуживания. Для проведения имитационного моделирования применены численные методы интегрирования дифференциальных уравнений. Программная реализация моделей и алгоритмов выполнена с использованием современных технологий создания программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок, основанная на жадном алгоритме с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата.

2. Масштабируемая имитационная модель для оценки целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, позволяющая анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций.

3. Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек, в которой для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик.

4. Результаты апробации разработанных методик, имитационной модели и программного комплекса на примере проектирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ.

Область исследования соответствует направлениям исследований паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика в части пунктов: 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановки задач, обоснованностью применяемых математических методов, подтверждается результатами имитационного моделирования и согласованностью с данными о целевых показателях функционирующих низкоорбитальных космических систем дистанционного зондирования Земли.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VI Козловские чтения) (г. Самара, АО «РКЦ «Прогресс», 30.09-03.10.2019);

XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства;

I Всероссийская научно - техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «малые космические аппараты»;

XXII Научно - техническая конференция учёных и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно - космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия»;

IX Международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2023);

X Международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2024);

Одиннадцатая международная научно-техническая конференция Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Всероссийская конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий»;

Совместная III Отраслевая научно-практическая конференция "Созвездие Роскосмоса: траектория науки" и VIII Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космической техники" (VIII Козловские чтения).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе: 4 статьи опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 4 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus/Web of Science; 1 монография; 1 статья, в материалах научной конференции всероссийского уровня; получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Общий объём диссертации – 191 страница, включает 19 таблиц, 72 рисунка. Список литературы содержит 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследований, описывается современное состояние проблемы, излагается научная новизна работы.

В первой главе проведён анализ современных многоспутниковых систем ДЗЗ, их характеристик, методик оценки показателей эффективности функционирования, проведен анализ наземной инфраструктуры современных космических систем ДЗЗ, а также алгоритмов размещения наземных пунктов приёма информации (НППИ).

Эффективность многоспутниковой космической системы дистанционного зондирования Земли определяется способностью своевременно доставлять требуемые объемы информации ДЗЗ заданного качества пользователю. Этот процесс обеспечивается информационным взаимодействием между орбитальной группировкой и наземным сегментом, что служит основой для декомпозиции комплексной задачи синтеза системы.

Сформулирована в общем виде задача оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ, а также предложена декомпозиция решения задачи в виде иерархического процесса (рисунок 1) оптимизации орбитальной группировки и наземного сегмента, обеспечивающего прием целевой информации ДЗЗ.

Сформулирована в общем виде задача оптимального размещения наземных станций при обеспечении заданного уровня обслуживания орбитальной группировки:

$$F = \min \left\{ |G^*| : G^* \subseteq P, T_{req} \geq T_{req}^{\min} \right\},$$

где G^* – подмножество выбранных местоположений станций,

принадлежащих заданному географическому полигону с учетом ограничений:

$$G^* = \{g \in G \mid lat_{min}^{th} \leq lat_g \leq lat_{max}^{th}, g \in P\}.$$

Общая продолжительность сеансов связи должна быть не менее требуемого времени для передачи данных, накопленных КС: $T_{req} \geq T_{req}^{\min}$.

Во второй главе предложена методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ с учётом информационного баланса между орбитальной группировкой и наземной инфраструктурой, основанная на имитационном динамическом моделировании и учитывающая параметры построения орбитальной группировки, параметры целевой аппаратуры наблюдения, бортового запоминающего устройства и высокоскоростной радиолинии космических аппаратов, а также расположение наземных станций приёма. Методика позволяет проводить комплексную оценку покрытия заданных зон интереса, периодичности наблюдения, оперативности доставки информации, загрузки наземных станций приёма на этапах проектирования и эксплуатации космических систем.

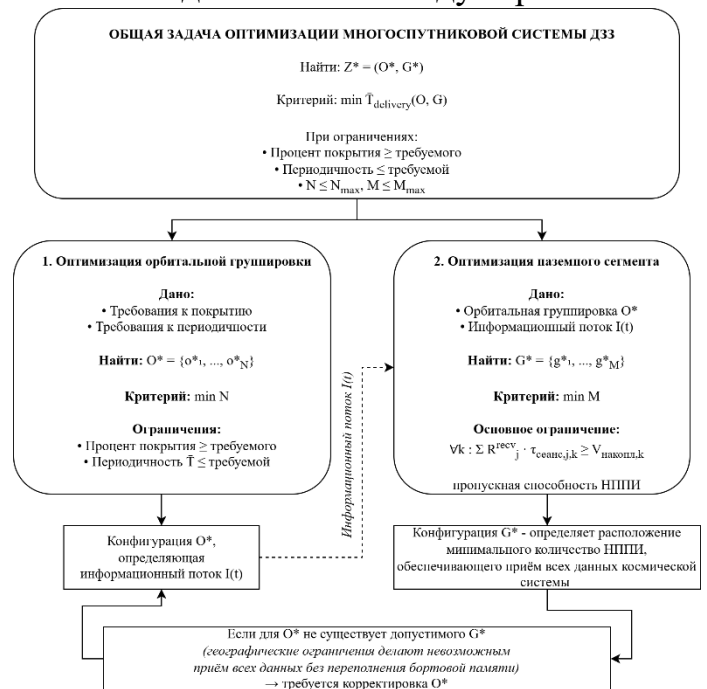


Рисунок 1 –Иерархия задач оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ с указанием критериев и ограничений

Разработанная методика выбора оптимального расположения наземных станций приёма информации основана на комплексном анализе орбитального движения космических аппаратов и информационных потоков. Методика включает следующие основные этапы:

1. Формирование множества потенциальных мест размещения наземных станций с учётом географических, инфраструктурных и политических ограничений.

2. Моделирование орбитального движения космических аппаратов и расчёт временных интервалов радиовидимости космических аппаратов с наземными станциями. Критерием видимости является выполнение неравенства $\theta \geq \theta_{min}$, где θ – угол возвышения КА над горизонтом; θ_{min} – минимально допустимый угол возвышения (обычно принимает значение от 5° до 10°). Угол возвышения вычисляется через разность векторов положения КА (\vec{r}_{sat}) и станции (\vec{r}_{st}) в геоцентрической системе $\vec{\rho} = \vec{r}_{sat} - \vec{r}_{st}$. Интервалы контактов выделяются путём анализа бинарной маски видимости $v(t)$, где $v(t) = 1$ при выполнении условия видимости в момент t . Начало и конец интервалов соответствуют переходам: $v(t_i) = 0 \rightarrow v(t_{i+1}) = 1$ или $v(t_i) = 1 \rightarrow v(t_{i+1}) = 0$.

3. Решение оптимизационной задачи по выбору минимального набора наземных станций, обеспечивающего требуемые показатели эффективности системы. Задача выбора оптимального расположения наземных станций сформулирована следующим образом: требуется найти минимальное подмножество станций $G^* \subseteq G$, обеспечивающее выполнение:

$$\sum_{c \in C(g_j), g_j \in G^*} \Delta t(g_j, o_i) \geq T_{req}(o_i), \quad \forall o_i \in O, \quad \text{где}$$

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – множество спутников с требованиями по времени передачи данных $T_{req}(o_i)$; $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ – множество станций каждая из которых имеет временные окна контактов $C(g_j) = \{[t_{start}^{(k)}, t_{end}^{(k)}]\}$ со спутниками.

Для решения данной задачи разработан алгоритм (рисунок 2), основанный на методе ветвей и границ с использованием эвристик для ускорения поиска решения.

Для оценки целевых показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ разработана масштабируемая агрегированная имитационная модель, учитывающая взаимодействие орбитальной группировки, объектов наблюдения и наземной инфраструктуры.

Модель включает следующие основные компоненты:

1. Модель оценки покрытия поверхности Земли. Поверхность Земли аппроксимируется регулярной сеткой точек, где координаты задаются в диапазоне: долгота: от -180° до 180° , широта: от -90° до 90° . Таким образом можно создавать как сетку точек для анализа глобального покрытия, так и создавать сетки точек

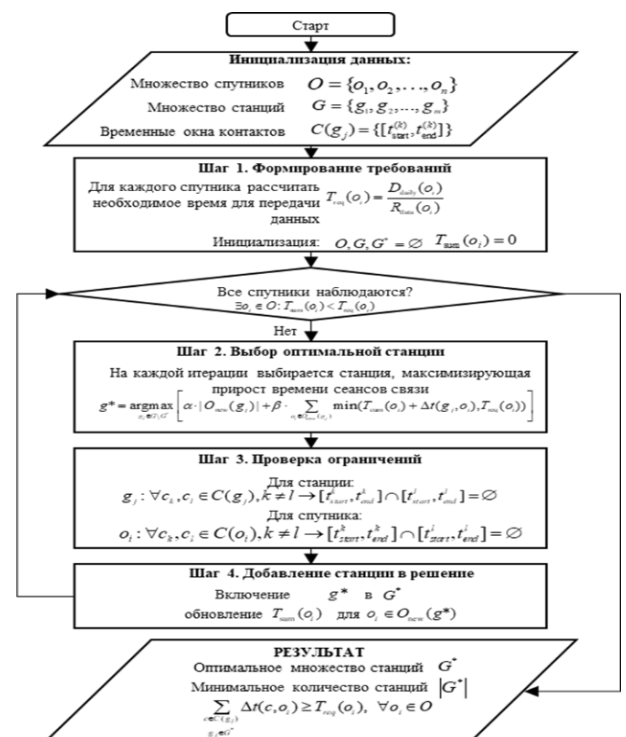


Рисунок 2 – Алгоритм решения задачи выбора минимального количества НПШ

только для локальных зон интереса.

Для того чтобы точка сетки считалась потенциально наблюдаемой, должны выполняться следующие условия: угол возвышения Солнца должен быть больше заданного $\theta_{sun} \geq \theta_{sun}^{min}$, а угол возвышения КА должен быть больше заданного: $\theta_{sat} \geq \theta_{sat}^{min}$. В зависимости от выбранного типа полезной нагрузки, для каждой временной отметки рассчитывается соответствующая область на поверхности Земли. Факт попадания точек сетки определяется в тот момент, когда точка находится в пределах зоны обзора целевой аппаратуры. На рисунке 3 а представлены результаты моделирования одного витка орбиты КА с круговой ($\alpha = 15^\circ$), на рисунке 3 б прямоугольной ($\alpha_h = 25^\circ$, $\alpha_v = 3^\circ$) зонами захвата аппаратуры наблюдения, при $H = 500$ км и заданных ограничениях: $\theta_{sun}^{min} = 10^\circ$, $\theta_{sat}^{min} = 20^\circ$.

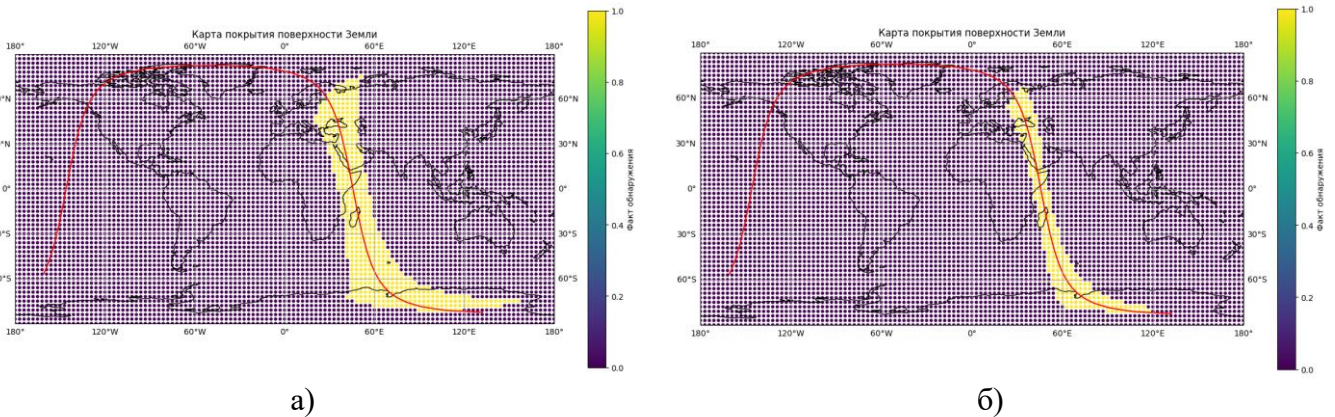


Рисунок 3 – Результаты моделирования одного витка орбиты КА

2. Оценка периодичности наблюдения земной поверхности. Периодичность наблюдения определяется как интервал времени между последовательными событиями, когда заданная точка на поверхности Земли оказывается в зоне обзора полезной нагрузки спутника. Для каждой точки сетки извлекается множество временных меток наблюдений:

$$T_{obs}(point) = \{t_i | Obs(point, t_i) = 1, i = 1, 2, \dots, N\},$$

где M – число моментов, когда точка находится в зоне обзора, $Obs(point, t_i)$ – булевый временной ряд. Интервалы между последовательными наблюдениями рассчитываются как:

$$\Delta T_j(point) = T_{obs}(point)[j+1] - T_{obs}(point)[j], j = 1, 2, \dots, M-1.$$

В случае, если точка не наблюдается или наблюдение происходит единожды, интервал интерпретируется как недоступный для оценки или равный бесконечности.

3. Модель формирования информационного потока на борту КА

Суммарный информационный поток, генерируемый КА за сутки, может быть рассчитан как:

$$V_{day} = \sum_{i=1}^{N_{sessions}} V_i,$$

где: $N_{sessions}$ – количество сеансов съёмки за сутки; V_i – объем информации, полученный в i -м сеансе съёмки.

Состояние бортовой памяти в момент времени t рассчитывается по формуле:

$$V_{memory}(t) = V_{memory}(t_0) + \int_{t_0}^t [r_{in}(\tau) - r_{out}(\tau)] d\tau,$$

где: $V_{memory}(t_0)$ – объем занятой памяти в начальный момент времени t_0 ; $r_{in}(t)$ – скорость поступления данных от целевой аппаратуры; $r_{out}(t)$ – скорость передачи данных на наземные станции.

4. Оценка оперативности доставки информации

Оперативность доставки информации определяется как время от момента съёмки до момента получения данных на наземной станции. Для оценки оперативности доставки информации выполняется имитационное моделирование полного цикла получения, хранения и передачи данных.

Время доставки данных для участка, снятого в момент $t_{imaging}$, рассчитывается как:

$$T_{delivery} = t_{downlink} - t_{imaging},$$

где $t_{downlink}$ – момент времени, когда данные были переданы на наземную станцию.

Для моделирования оперативности доставки информации с использованием нескольких наземных станций:

- определяются моменты видимости для каждой наземной станции g_j :

$$T_{visibility}^s = \left\{ (t_{start}^{s,i}, t_{end}^{s,i}) \mid i = 1, 2, \dots, N_{passes}^s \right\},$$

где $(t_{start}^{g,i}, t_{end}^{g,i})$ – интервал времени i -го пролёта КА над станцией g_j , N_{passes}^g – количество пролётов над станцией g_j за рассматриваемый период.

- объединяются все интервалы видимости в общий набор, упорядоченный по времени начала интервала:

$$T_{visibility}^{all} = \bigcup_{g=1}^{N_{stations}} T_{visibility}^g$$

- выполняется моделирование передачи данных с учётом ограничений каждой станции:

- рассчитывается оперативность доставки для каждого участка съёмки:

$$T_{delivery}^j = t_{downlink}^j - t_{imaging}^j,$$

где $t_{downlink}^j$ – момент времени, когда данные для j -го участка были полностью переданы на наземную станцию.

В третьей главе представлено описание разработанного программного комплекса, его архитектуры, алгоритмического обеспечения и основных функциональных возможностей.

Разработан программный комплекс для моделирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ на базе языков программирования Java и Python, реализующий предложенную имитационную модель и алгоритмы оптимизации размещения наземных станций приёма. Комплекс обеспечивает моделирование орбитального движения группировок до двухсот космических аппаратов, расчёт информационных потоков с учётом характеристик целевой аппаратуры и бортовой памяти, а также вычисление статистических характеристик покрытия, периодичности наблюдения и оперативности доставки информации, что позволяет проводить многовариантные исследования эффективности многоспутниковых систем.

Архитектура программного комплекса включает следующие основные модули:

1. Модуль моделирования орбитального движения, реализующий алгоритмы интегрирования уравнений движения с учётом основных возмущающих факторов.

2. Модуль выбора проектных характеристик многоспутниковой системы. Модуль обеспечивает комплексное задание параметров космической системы, учитывающих как орбитальную, так и наземную составляющие. Особое внимание уделяется заданию ограничений на работу бортовой аппаратуры, которые важны для реалистичного моделирования функционирования системы.

3. Модуль моделирования целевого функционирования многоспутниковых систем. В основе модуля (рисунок 4) лежат алгоритмы расчёта зон видимости и оптимизации расписания связи.

Модуль позволяет выполнять моделирование как в ускоренном режиме для быстрой оценки интегральных показателей эффективности, так и в режиме реального времени для детального изучения взаимодействия элементов системы. Предусмотрена возможность остановки моделирования, изменения параметров и продолжения с учётом внесённых изменений, что обеспечивает гибкость при анализе различных сценариев работы системы.

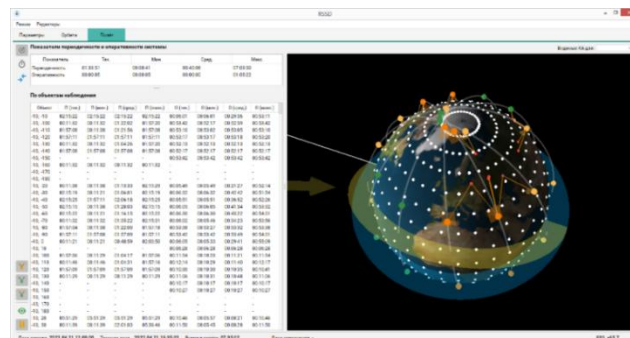


Рисунок 4 – Окно модуля моделирования целевого функционирования

5. Модуль оценки эффективности разработанной системы, предназначенный для расчёта и представления различных показателей эффективности космической системы на основе результатов имитационного моделирования.

Программный комплекс обеспечивает следующие основные функциональные возможности:

- моделирование орбитального движения космических аппаратов;
- расчёт зон видимости космических аппаратов и наземных станций;
- моделирование процессов съёмки земной поверхности с учётом характеристик целевой аппаратуры;
- оптимизация размещения наземных станций приёма информации;
- моделирование информационных потоков между космическими аппаратами и наземными станциями;
- расчёт целевых показателей эффективности системы;
- визуализация результатов моделирования в различных форматах.

Программный комплекс прошёл верификацию путём сравнения результатов моделирования с данными о существующих низкоорбитальных группировках ДЗЗ, что подтвердило адекватность используемых моделей и алгоритмов.

В четвертой главе с помощью предложенной методики, алгоритмов и программного комплекса проведена оценка показателей функционирования двух многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли: системы квазинепрерывного глобального обзора со сверхвысоким пространственным разрешением и системы специализированного мониторинга Арктического региона и Северного морского пути.

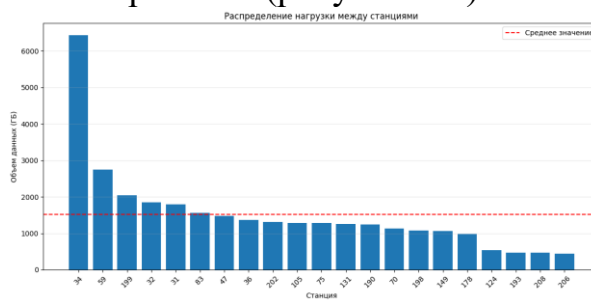
Решена задача выбора проектных параметров и анализа показателей функционирования космической системы квазинепрерывного глобального обзора со сверхвысоким пространственным разрешением. Проведён анализ проектных параметров целевого информационного тракта космического аппарата дистанционного

зондирования Земли. Получена зависимость информационного потока ОЭА от высоты орбиты КА.

Выполнен выбор орбитальных параметров группировки низкоорбитальных КА. В результате многокритериальной оптимизации определено, что оптимальными параметрами являются высота 350 км и наклонение $96,85^\circ$, соответствующие солнечно-синхронной орбите. Выполнен поиск оптимального расположения наземных пунктов приёма информации (рисунок 5 а). Определено оптимальное количество и географическое расположение наземных пунктов приёма информации для трёх вариантов спутниковых группировок. В результате показано, что нагрузка на станции распределяется неравномерно во всех вариантах (рисунок 5 б).



а) Координаты НППИ

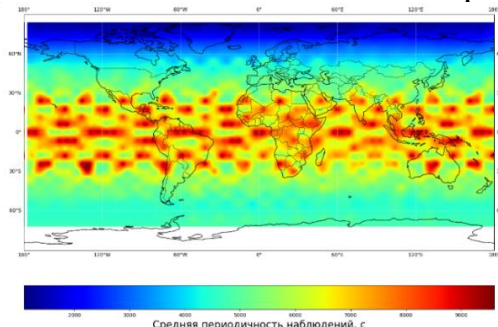


б) Распределение нагрузки между станциями

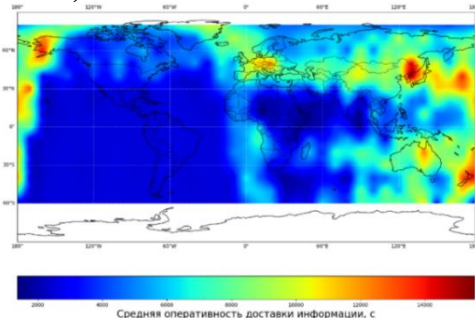
Рисунок 5 – Результаты поиска географического распределения НППИ для спутниковой группировки

Дальнейшая оптимизация распределения нагрузки возможна путём корректировки расположения станций или увеличения их количества, однако это может противоречить критерию минимизации количества станций. Другим способом распределения нагрузки между НППИ может стать использование межспутниковой связи при функционировании космической системы.

Проведена оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли и оперативность доставки информации различными вариантами группировок. Рассмотрены три варианта: 42 КА в 7 плоскостях, 54 КА в 9 плоскостях и 72 КА в 9 плоскостях. Все варианты обеспечивают покрытие более 94% поверхности Земли с учётом ограничений на освещённость. Вариант №3 (54 КА в 9 плоскостях) обеспечивает среднюю периодичность наблюдения 6533 секунды (около 1,82 часа), что является оптимальным соотношением между характеристиками системы и временем, затраченным на её развёртывание. Показано, что оперативность зависит от расположения объектов наблюдения относительно НППИ и количества спутников в группировке. Вариант №3 обеспечивает приемлемые показатели оперативности для большинства районов (рисунок 6).



а) Средняя периодичность наблюдений



б) Средняя оперативность

Рисунок 6 – Тепловые карты средней периодичности и оперативности для спутниковой группировки глобального обзора

Выполнен анализ показателей функционирования радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли в решении задач мониторинга Арктического региона и Северного морского пути (СМП). Разработаны требования к космической системе радиолокационного мониторинга акватории Северного морского пути.

Разработаны предложения по созданию радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли для решения задач мониторинга Северного морского пути. Определены проектные параметры систем и произведена оценка показателей их эффективности. Показано, что оптимальной архитектурой для мониторинга СМП является комбинированная система, интегрирующая 2 КА на высокоэллиптических орбитах (типа «Молния») для обеспечения непрерывного наблюдения и 20 КА на солнечно-синхронных орбитах для высокдетальной съемки. Данное решение обеспечивает 100% покрытие акватории с высокой периодичностью (от 15–30 минут для ВЭО и до 2–4 часов для ССО (рисунок 7)). В качестве НППИ-кандидатов рассматривались 10 приемных станций ЕТРИС ДЗЗ России. Показано, что для обеспечения приёма достаточно 7 из 10 НППИ ЕТРИС ДЗЗ.

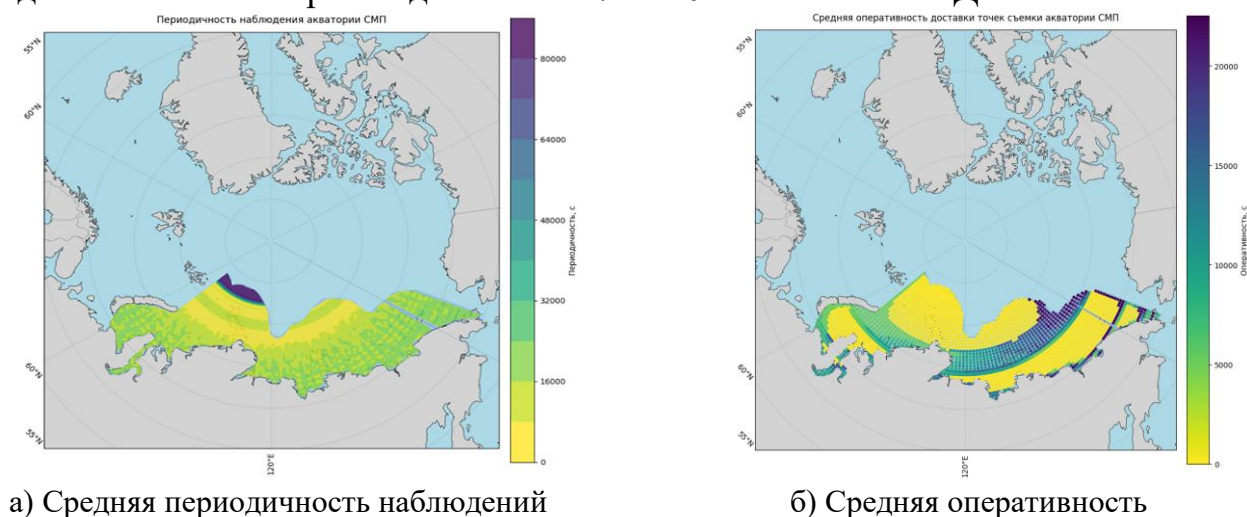


Рисунок 7 – Тепловые карты средней периодичности и оперативности для спутниковой группировки для наблюдения акватории СМП

Таким образом, разработанная методика и программный комплекс позволяют оценивать параметры многоспутниковых группировок ДЗЗ и выбирать оптимальные проектные решения с учётом различных критериев эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого диссертационного исследования разработана методика оценки показателей функционирования низкоорбитальных многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли, учитывающая информационное взаимодействие орбитальной группировки и наземных станций приёма. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок. Выбор координат размещения станций осуществляется жадным алгоритмом с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата. Методика позволяет сократить количество наземных станций приёма при обеспечении требуемой оперативности доставки информации.

2. Разработана масштабируемая агрегированная имитационная модель для оценки целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, позволяющая анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций. В модели осуществляется моделирование работы целевой аппаратуры наблюдения с расчётом объёма генерируемых данных, состояние бортовой памяти космических аппаратов рассчитывается интегрированием скоростей поступления данных от целевой аппаратуры и передачи на наземные станции, а сеансы связи моделируются с использованием очередей передачи данных.

3. Разработана методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек. Для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик. Методика позволяет получать количественные оценки процента покрытия заданного региона, периодичности наблюдения и оперативности доставки информации в зависимости от варьируемых параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и расположения наземных станций приёма.

4. Разработан и реализован программный комплекс для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, имеющий модульную архитектуру. Комплекс включает модули выбора проектных характеристик систем, моделирования целевого функционирования и оценки показателей эффективности.

5. Проведена апробация разработанных методик, имитационной модели и программного комплекса на примере проектирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ. Выполнен анализ целевого информационного тракта группировки, проведена оценка оперативности доставки информации наблюдения на наземные станции приёма. Разработаны тепловые карты, демонстрирующие распределение показателей периодичности наблюдения и оперативности доставки информации для различных регионов Земли, в том числе Арктического региона и акватории Северного морского пути.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с расширением разработанной методики и моделей для учёта межспутниковых линий связи и передачи данных через спутники-ретрансляторы, включая геостационарные или высокоорбитальные аппараты; интеграцией разработанного подхода с методами интеллектуального планирования целевого применения космических систем ДЗЗ; адаптацией методики для оценки показателей функционирования многоуровневых систем наблюдения, включающих низкоорбитальные, высокоорбитальные космические и авиационные средства ДЗЗ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Иванушкин, М.А.** Оценка эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли [Текст] / **М.А. Иванушкин, И.С. Ткаченко** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 101–110. – DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110.

2. **Иванушкин, М.А.** Оценка проектных характеристик низкоорбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли [Текст] / **М.А. Иванушкин, О.Д. Жалдыбина** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 5. – С. 85–96. – DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-85-96.

3. Ткаченко, И.С. Информационная система поддержки предварительного проектирования

малых космических аппаратов [Текст] / И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, М.Д. Коровин, **М.А. Иванушкин**, А.В. Крестина // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 75–89.

4. Ткаченко, И.С. Архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления перспективными многоспутниковыми системами на базе данных телеметрических измерений [Текст] / И.С. Ткаченко, **М.А. Иванушкин** // Авиакосмическое приборостроение. – 2025. – № 3. – С. 3–14. – DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2025.1465.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых базами Scopus и WoS:

5. Akhmetov, R «AIST-2D»: Results of flight tests and application of earth remote sensing data for solving thematic problems [Text] / R. Akhmetov, A. Filatov, R. Khalilov, S. Raube, M. Borisov, V. Salmin, I Tkachenko, S. Safronov, **M. Ivanushkin** // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2023. – Vol. 26, No. 3. – P. 427-454. – DOI 10.1016/j.ejrs.2023.06.003.

6. **Ivanushkin, M.** Design methodology for a multi-satellite global continuous observation system of the Earth [Text] / **M. Ivanushkin**, I. Tkachenko, A. Krestina // 2022 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2022. – 2022. – DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848609.

7. Salmin, V.V. Modeling of onboard systems operation of small satellites based on general logical-probabilistic method [Text] / V.V. Salmin, I.S. Tkachenko, **M.A. Ivanushkin**, S.S. Volgin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. Issue 1. – DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012086.

8. Salmin, V.V. Determination of the main design parameters of cost-effective remote sensing satellite systems at the stage of preliminary design [Text] / V.V. Salmin, V.I. Kurenkov, S.L. Safronov, I.S. Tkachenko, A.A. Yakischik, **M.A. Ivanushkin**, S.S. Volgin, A.V. Krestina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. – Issue 1. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012089.

Монография:

9. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ [Текст]: монография / С.Л. Сафронов, И.С. Ткаченко, **М.А. Иванушкин**, С.С. Волгин; под ред. В.В. Салмина. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2019. – 276 с.

Статья, опубликованная в других изданиях:

10. **Иванушкин, М.А.** Многоспутниковые группировки дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и перспективы развития [Текст] / **М.А. Иванушкин**, И.С. Ткаченко // Сборник тезисов XLV Академических чтений по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. – 2021. – Т. 1. – С. 65–69.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614620. Программа Constellation modeler (ConMod) для моделирования целевого функционирования космической системы мониторинга / В.В. Салмин, В.И. Куренков, И.В. Кауров, А.В. Крестина, **М.А. Иванушкин**, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов – Заявка №2022686687. Дата поступления 29 декабря 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2023 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612104. Программа Russian Space System Developer (RSSD) для моделирования целевого функционирования и оценки эффективности многоспутниковых космических систем различного назначения / И. С. Ткаченко, С. Л. Сафронов, **М. А. Иванушкин**, И. В. Кауров. – Заявка №2023610597. Дата поступления 17 января 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2023 г.