

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор

МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н., профессор

Дроговоз П.А.



2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на диссертационную работу Иванушкина Максима Александровича «Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых систем мониторинга Земли с учётом выбора координат наземных пунктов приёма информации», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

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 (Bruce 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.

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

Входящий № 206-4449
Дата 20 МАЙ 2026
Самарский университет

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 показателями периодичности наблюдения и оперативности доставки целевой информации на наземные пункты приёма.

Автор исследует вопросы совместной оптимизации баллистического построения группировок и размещения наземных пунктов приёма информации (НППИ). Особое внимание уделено мониторингу Арктического региона и Северного морского пути, что имеет стратегическое значение для обеспечения безопасности судоходства и экономического развития РФ.

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 результатов, полученных автором, подтверждена публикациями и апробацией:

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.

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.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке масштабируемой агрегированной математической модели, которая интегрирует имитационное моделирование орбитального движения с моделями информационных потоков. Автором формализованы системные связи между характеристиками съёмочной аппаратуры, параметрами бортового запоминающего устройства, высокоскоростной радиолинии и географическим расположением наземных пунктов приёма. Это вносит

значительный вклад в методологию системного анализа многоспутниковых космических систем.

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью и могут быть использованы при проектировании и оценке эффективности функционирования перспективных космических систем мониторинга. Разработанный программный комплекс RSSD, защищенный свидетельствами о государственной регистрации, внедрен в практику проектных исследований для обоснования облика радиолокационных систем мониторинга Арктики и систем квазинепрерывного глобального обзора.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 84 наименований и двух приложений. Общий объём работы составляет 189 страниц, включая 19 таблиц и 72 рисунка.

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет работы, показаны научная новизна и практическая значимость. Указаны список публикаций и апробация работы.

В первой главе проведён системный анализ тенденций развития отрасли ДЗЗ, выявлены ограничения существующих методик синтеза систем. Сформулирована иерархическая задача оптимизации параметров орбитальной группировки и наземного сегмента, где критерием системного уровня выступает минимизация средней оперативности доставки информации.

Во второй главе представлен математический аппарат исследования. Описано использование модели SGP4 и формата TLE для прогнозирования движения КА. Разработан алгоритм выбора координат НППИ, обеспечивающий минимизацию их количества при соблюдении ограничений на непересечение интервалов радиовидимости и выполнение суточного плана передачи данных. Предложена методика имитационного моделирования покрытия на основе дискретной регулярной сетки точек земной поверхности, а также разработана математическая модель информационного потока, учитывающая динамику заполнения бортовой памяти в зависимости от режимов съёмки и доступности станций.

В третьей главе описана архитектура и функциональные возможности разработанного автором программного комплекса RSSD. Комплекс имеет модульную структуру, включающую блоки выбора параметров КА, моделирования целевого функционирования и оценки эффективности. Реализована система интерактивной трёхмерной визуализации орбитальных структур, зон обзора и линий связи в реальном времени. ПО позволяет проводить многовариантные исследования, рассчитывать статистические показатели функционирования (периодичность, оперативность) и экспортировать результаты в виде детализированных тепловых карт и диаграмм Ганта.

В четвёртой главе приведены результаты практической апробации разработанных методов. Обоснованы параметры группировки из 54 КА на солнечно-синхронных орбитах (высота 350 км), обеспечивающей среднюю

периодичность наблюдения 1,82 часа. Решена задача мониторинга Северного морского пути: доказано, что использование комбинированной системы (20 КА на ССО и 2 КА на орбитах «Молния») обеспечивает 100% покрытие региона. Получены оценки оперативности, согласно которым доставка 80% данных осуществляется быстрее чем за 1,4 часа, что подтверждает эффективность предложенных архитектурных решений.

В заключении сформулированы следующие основные результаты работы:

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.

По тексту диссертационной работы можно сделать определенные замечания, не влияющие на общую положительную оценку:

1. Для минимизации количества НППИ автор использует жадный алгоритм, который, как указано в работе, обеспечивает линейную сложность, но гарантирует лишь локальную оптимальность решения. В работе не проведено сравнение с методами глобальной оптимизации для оценки потенциала дальнейшего сокращения наземной инфраструктуры.

2. В первой главе автор рассматривает минимизацию количества космических аппаратов (КА) и количества НППИ как независимые критерии, направленные на снижение затрат в соответствующих сегментах. В работе не в полной мере отражен экономический компромисс между стоимостью орбитального сегмента (например, за счет увеличения бортовой памяти) и затратами на развертывание наземного сегмента.

3. Разработанная имитационная модель не учитывает возможность динамического перепланирования задач съёмки и передачи данных в режиме реального времени, что является важным фактором для перспективных систем с развитым бортовым интеллектом.

4. В имитационной модели не в полной мере учитывается возможность передачи данных через спутники-ретрансляторы, что является важным фактором для современных многоспутниковых систем. В текущей версии методики расчет оперативности доставки данных для Арктического региона проводился при условии отсутствия межспутниковых каналов связи. Учитывая современные тенденции развития многоспутниковых систем (например, Starlink или группировки Planet), интеграция модели межспутниковых линий связи (МЛС) могла бы радикально изменить требования к количеству и географическому распределению НППИ на территории РФ.

5. В методике формирования НППИ-кандидатов упоминается необходимость исключения регионов с высокой частотой осадков, которые могут негативно влиять на радиосвязь. Однако в самой имитационной модели при расчете объемов передаваемой информации используется фиксированная скорость передачи данных по радиоканалу.

Сделанные замечания не снижают научной ценности результатов.

Диссертация Иванушкина М.А. является завершённой работой, самостоятельно выполненной на высоком уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной, и соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Представленная диссертация «Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых систем мониторинга Земли с учётом выбора координат наземных пунктов приёма информации» соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Правительством РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Иванушкин Максим Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании кафедры «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов» 27 апреля 2026 года, протокол № 04.54-04/7.

Отзыв ведущей организации подготовил:

Кандидат технических наук, доцент.
Кафедра динамики и управления
полётом ракет и космических
аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана

В.В. Корянов

Почтовый адрес: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, стр.1.
Телефон: +7 (916) 717-62-53, e-mail: vkoryanov@bmstu.ru