

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

На правах рукописи



Кутоманов Алексей Юрьевич

**МЕТОД БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ МНОГОСПУТНИКОВЫХ
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ
ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Специальность 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов (технические науки)

автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва, 2025 г.

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный консультант: **Матюшин Максим Михайлович** – д.т.н., первый заместитель генерального директора – начальник ЦУП АО «ЦНИИмаш»

Официальные оппоненты: **Ахметов Равиль Нургалиевич** – д.т.н., первый заместитель генерального директора – генеральный конструктор АО «РКЦ «Прогресс»

Баранов Андрей Анатольевич – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Беганов Владимир Вадимович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник-эксперт АО «Российские космические системы»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования Министерства обороны Российской Федерации Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д.13

Защита состоится «02» апреля 2026 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=186746

Автореферат разослан «____» _____ 202 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.03, д.т.н., доцент



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Основные положения государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу предполагают постоянное расширение числа космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для удовлетворения достаточно высоких требований Федеральных органов исполнительной власти к качеству и периодичности предоставления данных съемок поверхности Земли.

Существенное наращивание спутниковой группировки КА ДЗЗ и появление многоспутниковых космических систем (КС) с числом КА 100 и более определяет необходимость развития новых подходов к организации их управления, в том числе учитывающих необходимость сокращения техногенного засорения околоземного космического пространства (ОКП). Существующие подходы к управлению полетами основаны на управлении КА по принципу «точка-точка-точка» (ЦУП – пункт управления – КА), т.е. каждым КА, входящим в КС, управляют индивидуально. Очевидно, что использование таких подходов к многоспутниковым КС приведет к постоянной потребности в увеличении ресурсов, необходимых для управления полетом, пропорционально увеличению числа КА в КС. Исходя из этого, важнейшим условием для обеспечения управления постоянно расширяющимися КС является разработка новых подходов, предполагающих создание унифицированных компонентов, способных в автоматизированном режиме оперативно решать задачи управления разнородными КА, входящими в многоспутниковую КС ДЗЗ, в единой среде с учетом ограниченных ресурсов.

Так как для решения задач ДЗЗ КС рассматривается как транспортная система, важнейшей составляющей управления полетами такой КС является баллистико-навигационное обеспечение (БНО), основной задачей которого является обеспечение требуемого пространственно-временного положения КА, позволяющего решать целевые задачи КС с заданными характеристиками. Поэтому в диссертационном исследовании рассматривались вопросы оперативного БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ из единого центра с учетом ограниченных ресурсов.

Таким образом, **научная проблема** заключается в необходимости разрешения противоречия между объективной потребностью в оперативном решении задач БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП из единого центра без увеличения числа задействуемых ресурсов ЦУП пропорционально увеличению числа управляемых КА в КС, с одной стороны, и недостаточного развития

теории организации процессов БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ, с другой стороны.

Степень разработанности исследования

Разработка подобного метода является сложной и до настоящего времени не решенной научной проблемой. Вместе с тем отдельные аспекты научной проблемы рассматривались в работах таких видных отечественных и иностранных ученых, как: Аверкиев Н.Ф., Ахметов Р.Н., Баранов А.А., Бетанов В.В., Ключников В.Ю. Лысенко Л.Н., Малышев В.В., Матюшин М.М., Мосин Д.А., Потюпкин А.Ю. Почукаев В.Н., Разумный Ю.Н., Салов В.В., Старков А.В., Ступак Г.Г. Улыбышев Ю.П., Yulin Zhang, Li Fan и др. Поэтому в диссертационном исследовании были учтены результаты, полученные в работах этих ученых.

Объект исследования

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается КС ДЗЗ, как единая территориально-распределенная информационная система, одной из главных задач которой является предоставление потребителю данных ДЗЗ с требуемыми характеристиками.

Предмет исследования

Математические модели и методы решения задач оперативного БНО управления полетами КС ДЗЗ, обеспечивающие выполнение целевой задачи КС в целом, алгоритмы управления движением КА в составе КС.

Цель и задачи диссертационной работы

Настоящая диссертационная работа направлена на формирование метода, теоретического и прикладного задела для решения научной проблемы баллистико-навигационного обеспечения управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ из единого центра в условиях техногенного засорения ОКП с учетом необходимости оперативного решения всех задач БНО управления полетами ограниченными ресурсами.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **научные задачи**:

1. Проводится декомпозиция процессов БНО управления космических систем ДЗЗ, включающих разнородные КА, на отдельные формализованные задачи.
2. Разрабатывается система взаимосвязанных математических моделей оперативного БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ, описывающая состав и структуру средств для решения баллистических задач.
3. Проводится комплексный анализ возможности использования существующих подходов к БНО управления КС, состоящих из нескольких десятков КА, к

аналогичным задачам, решаемым для управления полетом многоспутниковых космических систем ДЗЗ, состоящих более чем из 100 КА.

4. На основе проведенного анализа создается метод БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП, позволяющий синтезировать следующие методики: построения единого баллистического информационного пространства, построения системы планирования процессов БНО управления полетами, а также поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом.

5. Для реализации предложенного метода на практике определяются принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса решения задач БНО управления полетом многоспутниковых КС в условиях техногенного засорения ОКП.

Научная новизна

В работе изложены научно обоснованные технические решения, обладающие научной значимостью:

1. Предложено рассматривать процессы БНО управления многоспутниковой космической системой ДЗЗ в привязке к выполнению целевых задач КС в целом.

2. Впервые разработана комплексная математическая модель БНО управления полетами, учитывающая возможность расчета показателей решения целевых задач системой в целом, а также особенности функционирования КА в ОКП с учетом его техногенного засорения.

3. Обоснованы объективные критерии оценивания возможности использования существующих подходов к решению задач БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ.

4. Разработана методика построения единого баллистического информационного пространства, позволяющего осуществлять параллельное моделирование движения КА, функционирующих на различных орбитах, имеющих различный состав источников навигационных измерений, различную точность определения орбит, время автономного существования (без задействования средств НКУ), а также различные характеристики целевой аппаратуры в единой среде моделирования.

5. Разработана методика построения системы планирования процессов БНО управления полетами, позволяющая в автоматизированном режиме создавать планы проведения баллистических расчетов на различные интервалы времени, обеспечивать связь созданных планов с конкретными вычислительными задачами, а также отслеживать их выполнение, проводить предварительную оценку правильности решения баллистических задач.

6. Разработана методика поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом, позволяющая существенно сократить общее число маневров, проводимых КА, по сравнению с существующими подходами, предполагающими жесткое поддержание баллистической структуры.

Практическая значимость работы

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития перспективных многоспутниковых КС ДЗЗ. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Подтверждена возможность сокращения времени решения задач БНО управления КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП (время на проведение расчетов сократилось в 26 раз для рассматриваемой КС).

2. Подтверждена возможность повышения уровня автоматизации планирования процессов БНО управления КС ДЗЗ (в результате число необходимых АРМ специалистов-баллистиков сократилось практически в 30 раз для рассматриваемой КС).

3. Предложен подход и подтверждена возможность моделирования КА, функционирующих на различных орбитах, имеющих различный состав источников навигационных измерений, различную точность определения орбит, время автономного существования, а также различные характеристики целевой аппаратуры в единой среде моделирования.

4. Предложен подход к формированию стратегии проведения маневров КА из состава многоспутниковой КС ДЗЗ с учетом необходимости поддержания заданных характеристик целевых задач системой в целом, что привело к сокращению числа маневров более чем в два раза для рассматриваемой КС на интервале моделирования в 1 год.

5. Предложен метод и обоснована принципиальная возможность создания автоматизированной системы БНО управления многоспутниковой КС ДЗЗ.

6. Предложен технический облик нового информационно-вычислительного комплекса для решения полного цикла задач БНО управления полетами посредством программной реализации единого баллистического информационного пространства, автоматизированной системы планирования процессов БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ и методики поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ.

7. Подтверждена возможность решения поставленной научной проблемы с помощью программной реализации предложенного метода.

Метод проведения исследования – расчетно-теоретический. При решении перечисленных научно-технических задач использовались методы теории интегрального и дифференциального исчисления, динамики космического полета, теории систем автоматического управления, теории оптимальных систем, теории вероятностей, численные методы решения дифференциальных уравнений, метод наименьших квадратов, метод статистического моделирования. Кроме того, при проведении исследований, синтезе методов и алгоритмов решения поставленных задач использован личный опыт работ в ЦУП АО «ЦНИИмаш» по БНО управления полетами автоматических КС ДЗЗ.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Комплексная модель оперативного БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП.
2. Методика построения единого баллистического информационного пространства, позволяющая моделировать движение разнородных КА в одной системе.
3. Методика построения системы планирования организации процессов БНО управления полетами, позволяющая осуществлять автоматизированное планирование и контроль решения баллистических задач.
4. Методика поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом.
5. Непосредственно метод БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП (как совокупность разработанных методик), отличающийся от известных возможностью оперативного решения всего спектра задач БНО управления полетами многоспутниковой КС ДЗЗ из единого центра с учетом необходимости соблюдения мер по снижению техногенного засорения ОКП в части проведения маневров уклонения и организованного завершения полета.
6. Результаты экспериментальной отработки метода БНО управления многоспутниковой КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП в условиях, приближенных к реальным.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной и аргументированной математической постановкой задач БНО управления полетами КА и КС ДЗЗ, а также частичной сверкой разработанных ходов диссертационного исследования методик и алгоритмов с отработанным программно-математическим обеспечением, используемым в течение длительного времени в ЦУП АО «ЦНИИмаш» для выполнения полного цикла задач БНО управления полетами.

Апробация работы проведена на научно-технических семинарах кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. Результаты работы докладывались и получили одобрение на научно-технических советах АО «ЦНИИмаш» и АО «РКС» в рамках обсуждения результатов составной части научно-исследовательской работы по теме: «Проектно-поисковые исследования и разработка макетов СПО БНО и СПО планирования задействования средств НАКУ для обеспечения управления объединенной многоспутниковой ОГ КА ДЗЗ», 26-й, 27-ей и 28-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (2021, 2022, 2023 гг.), 73 International Astronautical Congress (2022 г.), RUDN University Space Week (2022г.), XLIV, XLV, XLVI, XLVII академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва (2019, 2020, 2021, 2022г.г.), отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса» (2023 г.) и др.

Личный вклад и публикации

Все результаты, приведенные в диссертации, получены лично автором, либо в соавторстве. Основные положения и результаты опубликованы в 33 работах, из которых 14 в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, включённых ВАК России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, соответствующих специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, 3 - опубликованы в иностранных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены результаты формализации задач оперативного БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП. Для этого проведен анализ ведущих мировых и отечественных подходов к организации управления полетами таких систем, проведена декомпозиция задач БНО управления полетами КС ДЗЗ, сформулированы основные проблемные вопросы организации процессов БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ с использованием существующих подходов.

Традиционные подходы к процессу управления автоматическими КА сформировались еще в 60-х годах XX века и реализованы в подавляющем большинстве ЦУП отечественными КА. Однако в последние годы осуществляется переход от управления единичными КА к управлению КС, число КА в которых постоянно растет. При организации процессов управления полетами таких КС в настоящее время применяется экстенсивный

подход, предполагающий увеличение числа вычислительных ресурсов и рабочих мест операторов пропорционально увеличению числа управляемых КА в системе. Такой подход к организации управления при существенном увеличении количества КА в КС неизбежно приведет к скорому достижению предельных возможностей по расширению средств обеспечения управления полетами и существенному удорожанию процессов управления.

Зарубежный опыт управления многоспутниковыми КС выявил тенденцию максимальной автоматизации решения задач типового штатного цикла управления. К настоящему времени существует единственная в мире успешно функционирующая многоспутниковая КС ДЗЗ компании «Planet», которая включает порядка 200 КА формата 3U. Для управления такой многоспутниковой КС используются традиционные подходы, поэтому для реализации всех процессов управления необходимо задействование множества наземных станций управления, расположенных в Северной Америке, Европе и Австралии.

Существующие отечественные подходы к БНО управления полетами КС предполагают необходимость ежедневного автоматизированного решения различных наборов задач БНО для каждого КА в КС, формируемых из месячного, недельного и суточного планов полета. Контроль правильности решения каждой задачи БНО осуществляется вручную оператором-баллистиком.

Анализ продолжительности и сложности операций БНО показал, что наиболее ресурсозатратной операцией является проведение коррекций орбиты КА, т.к. для ее выполнения необходимо провести целый ряд подготовительных операций, включая определение/уточнение параметров движения центра масс (ПДЦМ) КА по навигационным измерениям, расчет программы коррекций и контроль точности реализации коррекции параметров орбиты. Существующие подходы к БНО управления полетами предполагают, что коррекции орбитального положения КА, входящих в КС ДЗЗ, проводятся исходя из стратегии удержания элементов орбиты каждого КА в жестко определенном коридоре. Опыт проведения коррекций орбит различных существующих КА ДЗЗ, показал, что время на подготовку, проведение и оценку одной коррекции может занимать до нескольких часов, что становится критичным при существенном увеличении числа КА в КС.

С учетом необходимости управления многоспутниковой КС, актуальной задачей становится автоматизация планирования проведения баллистических расчетов, т.к. периодичность их проведения для различных КА может отличаться. На составление планов проведения баллистических расчетов существенное влияние оказывает необходимость учета неравномерности распределения по времени зон радиовидимости наземных средств и неравномерность распределения решаемых баллистических задач по дням недели. Исходя из этого, при проведении анализа возможности использования существующих подходов к

БНО управления многоспутниковых КС особое внимание было уделено двум временным факторам: необходимое время для проведения операций по подготовке, проведению и оценке коррекций орбиты КА для жесткого удержания баллистической структуры и время на планирование, непосредственное проведение и контроль правильности запланированных баллистических расчетов в соответствии с суточным планом полета. Проведенный анализ позволил выделить следующие факторы, оказывающие основное влияние на оперативность решения задач БНО, загрузку вычислительных ресурсов и число автоматизированных рабочих мест, при использовании существующих подходов для управления многоспутниковыми КС ДЗЗ:

1. Необходимость обеспечения проведения большого количества маневров, как для жесткого поддержания орбитальной структуры космической системы, так и для уклонения от космического мусора.

2. Отсутствие единых подходов к созданию специального математического обеспечения БНО управления различными КА, функционирующими на различных орбитах (в настоящее время под каждый КА и космическую систему создаются свои уникальные средства обеспечения оперативного БНО управления полетами, и, в случае увеличения числа управляемых КА и космических систем, пропорционально увеличивается число автоматизированных рабочих мест (АРМ) и операторов ЦУП).

3. Отсутствие автоматизированных систем планирования процессов БНО управления полетами разнородных КА и КС. В настоящее время планирование и контроль правильности решения баллистических задач, а также своевременность обмена баллистической информацией осуществляется в ручном режиме оператором-баллистиком для каждого КА в КС отдельно.

4. Отсутствие моделей и методов поддержания возможности решения целевых задач отдельными КА в контексте решения задач единой системой в целом. В процессе управления космическим полетом не оценивается возможность решения целевой задачи системой в целом, а только подбираются параметры коррекций положения центра масс КА для удержания в границах, определенных на этапе баллистического проектирования.

Таким образом, задачу оперативного БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП можно сформулировать как необходимость решения любой комбинации задач БНО управления полетами на сутки из единого центра с учетом ограниченного времени и ресурсов, исходя из безусловного решения целевых задач КС в целом.

Для формальной записи задачи с учетом сделанных предположений введем следующие обозначения:

$T = \{t_0, \dots, t_i : i = \overline{1, n}\}$ – множество единичных отрезков периода решения задач БНО.

$I = \{i_0, \dots, i_m : m = \overline{1, n}\}$ – множество образцов специального математического обеспечения, привлекаемых для решения задач БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ.

$J = \{j_0, \dots, j_k : k = \overline{1, n}\}$ – множество разновидностей работ, образующих область применения службы БНО.

Пусть

φ_{ijt} – количество единичных работ j -й разновидности, выполняемых с помощью i -го образца специального математического обеспечения на t -м отрезке времени;

p_{ijt} – количество средств i -го образца, назначаемых для выполнения единичной работы j -й разновидности на t -м отрезке времени;

V_{it} – ограничение сверху на возможный объем операций, производимых средствами i -го образца на t -м отрезке;

U_{it} – ограничение сверху на допустимое количество средств i -го образца в составе системы на t -м отрезке;

F_{it} – директивное значение оценки работоспособности системы на t -м единичном отрезке.

Введем также следующие переменные.

Переменные состава $u_{it} \geq 0, i \in I, t \in T$. Величина u_{it} равняется количеству средств i -го образца в составе системы на t -м отрезке.

Переменные пополнения состава $v_{it} \geq 0, i \in I, t \in T$. Величина v_{it} равняется количеству средств i -го образца, вводимых в состав системы на t -м отрезке.

Переменные уменьшения состава $w_{it} \geq 0, i \in I, t \in T$. Величина w_{it} равняется количеству средств i -го образца, изымаемых из состава системы на t -м отрезке.

Переменные назначения $x_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T$. Величина x_{ijt} равняется доле работ j -й разновидности, выполняемых средствами i -го образца на t -м отрезке.

С использованием введенных обозначений задача оперативного БНО записывается следующим образом.

$$\min_{t \in T} f \left(\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(\varphi_{ijt} p_{ijt} x_{ijt} - F_{jt} \right) \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$$u_{it} = u_{it-1} + v_{it} - w_{it}, i \in I, t \in T; \quad (2)$$

$$u_{it} \leq U_{it}, i \in I, t \in T; \quad (3)$$

$$v_{it} \leq V_{it}, i \in I, t \in T; \quad (4)$$

$$w_{it} \leq W_{it}, i \in I, t \in T; \quad (5)$$

$$x_{ijt} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J, t \in T; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \varphi_{jt} p_{ij} x_{ijt} \leq u_{it}, i \in I, t \in T; \quad (7)$$

$$u_{it}, v_{it}, w_{it}, x_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T; \quad (8)$$

В этой задаче целевая функция (1) выражает оценку возможности оперативного решения задач БНО. Соотношения (2) связывают составы системы на данном и предыдущем отрезках периода планирования, а неравенства (3) – (5) ограничивают соответственно состав системы, его пополнение и уменьшение. Переменные в выражении (6) отражают назначение i -го образца для выполнения единичной работы j -й разновидности на t -м отрезке времени, а неравенство (7) означает, что на каждом отрезке можно использовать только такое количество средств, какое имеется в составе системы. Наконец, неравенство (8) ограничивает интегральный коэффициент по всем переменным.

Во **второй главе** приводится краткое описание существующих и перспективных направлений развития средств и методов управления многоспутниковыми КС ДЗЗ, определяющих организацию БНО управления полетами. Показаны основные подходы, используемые для организации управления многоспутниковой КС ДЗЗ компании «Planet», а именно: использование обширной сети наземных станций, состоящей из 18 станций НКУ в S и X диапазонах частот с 36 антеннами, расположенными в Северной Америке, Европе и Австралии, использование 4-х территориально разделенных групп операторов управления, расположенных в г. Сан-Франциско и в г. Берлин.

Для обеспечения долгосрочной устойчивости космической деятельности и недопущения появления эффекта Кесслера, международные организации (ООН и др.) постоянно совершенствуют международные соглашения, правила и стандарты для сокращения роста техногенного засорения в ОКП. В большинстве своем для соблюдения требований международных договоров требуется увеличение числа проводимых маневров КА (для уклонения от космических объектов и для затопления КА), разработка моделей долгосрочного прогнозирования движения центра масс КА (для оценки времени существования в защищаемых районах на НОО и ГСО). Указанные требования учитывались при дальнейшем моделировании процессов БНО управления полетами многоспутниковых КС.

Исходя из проведенного анализа зарубежного опыта и отечественных предложений по организации управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ, а также анализа требований международных документов и правил, были сформулированы основные

направления организации БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ, которые легли в основу разрабатываемого метода: создание единого баллистического информационного пространства, создание автоматизированной системы планирования процессов БНО управления многоспутниковыми КС и создание методики поддержания баллистической структуры многоспутниковой космической системы ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом.

В третьей главе приводятся математические модели и алгоритмы, которые лежат в основе разработанного метода БНО управления полетом многоспутниковых космических систем ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП. Движение центра масс КА в пространстве описывается в виде дифференциальных уравнений, Общий вид правых частей уравнений:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\mu_e \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3} + \vec{F}_{grav} + \vec{F}_{atm} + \vec{F}_{pl} + \vec{F}_{sp} + \vec{F}_{tides} + \vec{F}_{thrust}$$

где, μ_e – гравитационная постоянная Земли, \vec{F}_{atm} – атмосферное торможение, \vec{F}_{pl} – гравитационное притяжение КА Луной, Солнцем и планетами солнечной системы, \vec{F}_{sp} – световое давление, \vec{F}_{tides} – возмущения от приливной деформации Земли, включая твердые и океанические приливы, вызванные притяжением Луны и Солнца, \vec{F}_{thrust} – возмущения, вызванные включением двигательной установки.

Для моделирования процессов БНО, кроме модели орбитального движения центра масс КА, используются следующие модели:

- модель определения параметров орбиты КА;
- модели решения задач БНО управления полетами КА, состоящими из: модели расчёта параметров светотеневой обстановки на орбите ИСЗ, модели расчета параметров зон радиовидимости и целеуказаний для наземных командно-измерительных станций и модели расчета начальных и конечных моментов времени видимости между КА;
- модель планирования процессов БНО управления полетами космических систем;
- модель расчета показателей решения целевых задач космической системой ДЗЗ в целом с учетом выбранного баллистического построения, состоящая из: модели расчета параметров полосы обзора многоспутниковой космической системой ДЗЗ, модели учета возмущающих факторов при расчете полосы обзора многоспутниковой космической системы ДЗЗ и модели расчета характеристик наблюдаемости земной поверхности многоспутниковой космической системой ДЗЗ;

– основные подходы к проведению орбитальных коррекций КА ДЗЗ, функционирующих на различных типах орбит.

Так как представленные модели и алгоритмы имеют сложные взаимосвязи между собой, для практической реализации предложенного метода в автоматизированной системе решения задач БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ на рис. 1 представлена схема распределения вышеуказанных моделей и алгоритмов по 4-м составляющим системы.



Рисунок 1 – Схема взаимосвязей моделей БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ.

Четвертая глава посвящена комплексному исследованию вопросов БНО управления многоспутниковых КС ДЗЗ с использованием существующих методов. В результате анализа были выявлены критические операции, требующие максимального времени для подготовки и проведения расчётов, а именно: проведение коррекций орбит КА, проведение маневров уклонения, а также решение задач планирования и контроля решения баллистических задач для каждого КА, входящего в КС ДЗЗ, на текущие сутки.

Комплексное исследование возможности использования существующих подходов к БНО управления КС ДЗЗ, состоящими из нескольких КА, применительно к решению аналогичных задач для многоспутниковых КС состояло из оценки по следующим характеристикам:

- максимальное число маневров КА, которые необходимо обеспечить за текущие сутки полета;
- максимальное число АРМ специалистов-баллистиков, необходимое для решения всех задач БНО управления многоспутниковой КС с учетом ограничений по оперативности решения задач;

– максимальное время, необходимое для решения всех задач БНО управления многоспутниковой КС существующими АРМ специалистов-баллистиков ЦУП.

В качестве исходных данных была выбрана планируемая к выведению в рамках Федерального проекта «Сфера» многоспутниковая КС ДЗЗ.

Для проведения комплексной оценки всех вышеперечисленных характеристик были разработаны методики, обеспечивающие наилучшую сходимость накопленных статистических данных с прогнозными значениями.

Для задачи оценивания максимально возможного числа маневров для жесткого поддержания баллистической структуры был разработан алгоритм проведения баллистических расчетов. Данный алгоритм основан на использовании отдельных составляющих единого баллистического информационного пространства, автоматизированной системы планирования и метода Монте-Карло, с помощью которого генерируются случайные наборы начальных условий движения КА, входящих в космическую систему ($\vec{r}(t) + \Delta\vec{r}(t)$), значения коридоров ограничений на различные параметры орбиты КА ($\Delta i, \Delta h, \Delta\omega \dots$), а также набор возмущений, влияющих на прогнозирование положения центра масс КА ($\Delta\rho, \Delta P, \Delta S_{\text{бал}} \dots$).

В результате проведенного моделирования, максимальное число маневров поддержания баллистической структуры составило 1081 за 1 год, либо в среднем 3 за день (без учёта необходимости проведения маневров уклонения и коррекции ошибок выведения), что более чем в 10 раз превышает число проводимых маневров для КА, управляемых из ЦУП АО «ЦНИИмаш».

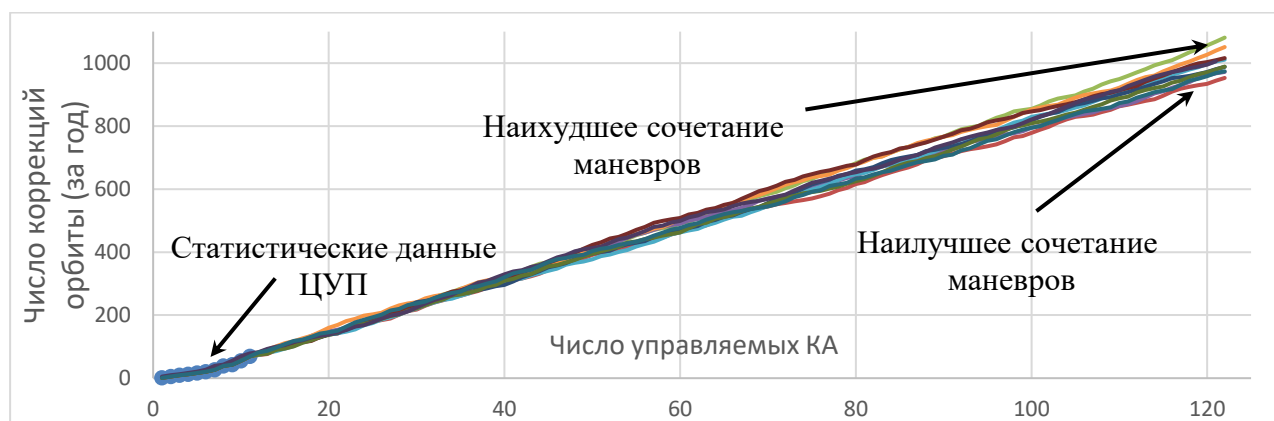


Рисунок 2 – Результаты моделирования методом Монте-Карло

При оценке минимального числа АРМ специалистов-баллистиков, которое необходимо для управления многоспутниковыми КС ДЗЗ, учитывалось одно основное ограничение - время, необходимое для планирования и проведения баллистических расчетов с последующей их проверкой, а также время, необходимое для обмена результатами расчётов с внутренними и внешними абонентами. Статистика, накопленная

при управлении разнородными КА, показывает, что для решения всех задач, необходимых для обеспечения управления полетами в одни сутки для 22 КА, управляемых из различных ЦУП, необходимо потратить 469 минут, либо практически 8 часов, если бы все баллистические расчеты проходили последовательно, однако, за счет того, что все вышеуказанные расчеты разделены по различным ЦУП, суммарное время, необходимое для проведения баллистических расчетов, может быть разделено на количество АРМ специалистов-баллистиков в ЦУП и занимает в среднем 21 минуту для каждого КА.

Так как число АРМ БНО управления полетами КА и КС выбираются из накопленного опыта, к настоящему времени не существует математических моделей, определяющих достаточное количество числа АРМ, обеспечивающих оперативное решение задач БНО управления полетами. Учитывая это, для анализа минимально необходимого числа АРМ БНО управления полетом многоспутниковой КС ДЗЗ воспользуемся методами аппроксимации статистических данных. Исходя из критерия минимизации квадрата невязок статистических данных от аппроксимирующей зависимости, найдем минимальное число АРМ, необходимых для обеспечения управления полетами многоспутниковой КС ДЗЗ. Наиболее достоверное приближение к статистическим данным показала аппроксимация полиномами Лежандра 2-й степени. Как видно из рисунка 3, статистические данные достаточно хорошо аппроксимируются найденной функцией, при этом число АРМ, необходимых для решения задач БНО управления полетом многоспутниковой КС ДЗЗ, получилось равным 310, что, в свою очередь, обеспечит время, необходимое для проведения всех расчетов от 15 до 40 минут, без учета времени на проведение обменов и парирование возможных нештатных ситуаций. Такое число АРМ специалистов-баллистиков может сравниться с полным числом АРМ управления пилотируемыми космическими комплексами по программе МКС.

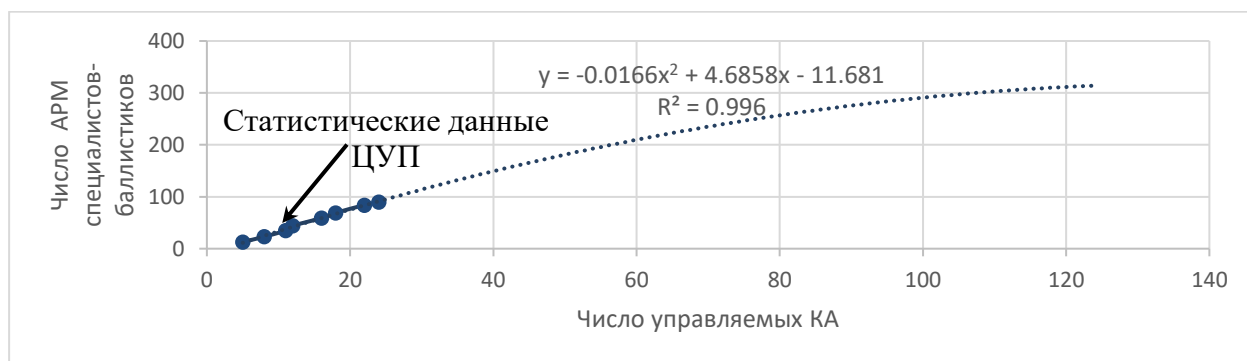


Рисунок 3 – Результаты аппроксимации полиномами Лежандра

С учетом результатов, полученных в результате оценивания необходимого числа маневров поддержания жесткой баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ,

числа АРМ специалистов-баллистиков, анализа существующей циклограммы проведения баллистических расчетов, а также методов планирования и выполнения вышеуказанных расчетов, были разработаны алгоритмы оценки минимального и максимального времени проведения баллистических расчетов для управления многоспутниковыми КС ДЗЗ с использованием существующих подходов. Для решения этой задачи была дополнена схема проведения расчетов максимально возможного числа маневров поддержания жесткой баллистической структуры многоспутниковой космической системы ДЗЗ, путем дополнительной разработки блоков формирования планов проведения баллистических расчетов на сутки и формирования плана задействования АРМ. Также был доработан блок формирования выходной информации в части возможности расчета времени решения баллистических задач.

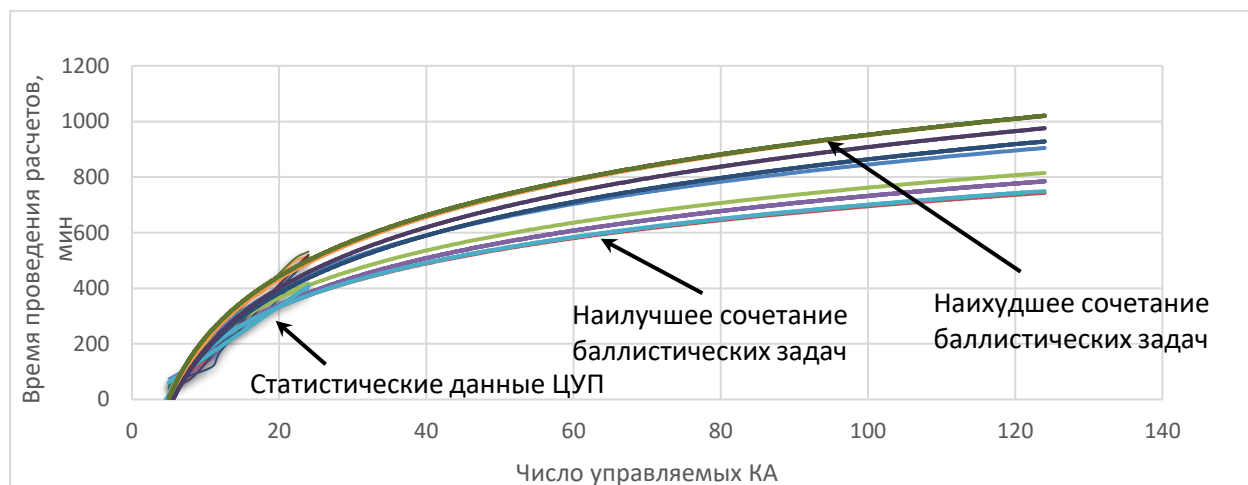


Рисунок 4 – Результаты расчетов времени решения баллистических задач

На рисунке 4 представлены результаты оценивания значения максимального времени, необходимого для проведения различных комбинаций баллистических расчетов для обеспечения управления многоспутниковой КС ДЗЗ, с использованием существующих подходов, а также ограниченным числом АРМ специалистов-баллистиков. Показано, что при наихудшем сочетании числа баллистических задач на текущие сутки для управления многоспутниковой КС ДЗЗ необходимо затратить более 1000 минут или порядка 17 часов в сутки. При этом результаты моделирования не учитывают время, необходимое на обмен информацией, парирование ошибок оператора, некорректную работу специального программного обеспечения, а также ошибок в исходных данных. Анализ полученных результатов моделирования показал достаточно высокую сходимость предложенного метода оценивания времени, необходимого для решения задач БНО управления многоспутниковыми космическими системами ДЗЗ, со статистическими данными.

Для сравнения корректности предложенных алгоритмов оценки времени на выполнение баллистических расчетов были выполнены аналогичные расчеты для многоспутниковой КС ДЗЗ, но с использованием 310 АРМ. Результаты моделирования одного из вариантов распределения баллистических задач и расчета времени их решения на одни сутки приведены на рисунке 5. Как видно, в зависимости от распределения числа баллистических задач, необходимых для обеспечения управления полетами многоспутниковой КС ДЗЗ на интервале в 1 сутки, время вычислений может варьироваться от 15 до 40 минут. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с накопленной статистикой.



Рисунок 5 – Результаты расчетов времени решения баллистических задач

Вышеуказанное позволяет сделать вывод, что для обеспечения решения задач БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ с использованием существующих подходов необходимо кратное увеличение используемых ресурсов, в противном случае, время, необходимое для проведения всех баллистических расчетов на сутки, оказывается существенно большим, чем необходимое время для оперативного управления. Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование существующих подходов для управления многоспутниковыми космическими системами ДЗЗ невозможно.

Пятая глава посвящена разработке комплексов алгоритмов и методик БНО управления многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП, состоящему из:

- методики построения единого баллистического информационного пространства, включающей в свой состав:
 - алгоритм выбора модели движения центра масс КА, входящих в единое баллистическое информационное пространство;

- алгоритм определения адекватности начальных условий движения центра масс КА, находящихся в едином баллистическом информационном пространстве.
- методики построения системы планирования процессов БНО управления многоспутниковыми КА ДЗЗ, включающей в свой состав:
 - метод планирования решения задач БНО управления полетов многоспутниковых КА ДЗЗ с использованием нейросетевых технологий;
 - алгоритм контроля выполнения задач БНО управления полетами КА ДЗЗ, а также перепланирования задач БНО в случае невозможности их выполнения.
- методики поддержания баллистической структуры многоспутниковой космической системы ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом, включающей в свой состав:
 - алгоритм расчета системного эффекта от избыточности баллистической структуры многоспутниковых космических систем ДЗЗ;
 - алгоритм расчета числа коррекций орбиты КА для поддержания характеристик решения целевых задач многоспутниковой космической системы ДЗЗ.

Единое баллистическое информационное пространство.

Основная цель создания единого баллистического информационного пространства – обеспечение возможности параллельного решения всех задач БНО управления каждого КА в многоспутниковой КС в единой среде, что позволит перейти к решению задач БНО для всех КС в целом, а не для каждого КА в отдельности. Для обеспечения моделирования движения разнородных КА, функционирующих на различных орбитах, имеющих различные источники навигационной информации и время автономной работы в едином баллистическом информационном пространстве, в его основу положено использование фундаментального виртуального пространства F , в котором были собраны и программно реализованы все известные модели движения центра масс КА в околоземном космическом пространстве, модели возмущения, которые могут действовать на КА в полете, а также все модели навигационных источников информации, использующиеся в настоящее время при управлении КА:

$$F = \Phi \cup N; \quad (9)$$

$$N = \{n_0, \dots, n_i\}; \quad (10)$$

$$\Phi = \{\phi_0, \dots, \phi_n\}; \quad (11)$$

$$\phi = \sum_{j=0}^m k_j; \quad (12)$$

$$n = \{\varphi, \lambda, Dx, \Delta f, \gamma, \Psi_i^{\text{пд}}, \Psi_i^{\text{пс}}\}; \quad (13)$$

где Φ – множество возмущающих факторов, влияющих на движение центра масс, N – множество источников навигационных измерений, ϕ – правые части дифференциальных уравнений движения центра масс, φ, λ – геодезические координаты наземной станции (при использовании наземного контура управления), Dx – значение среднеквадратической ошибки измерительной системы, используемое для определения весовой матрицы сеанса измерений, $\Psi_i^{\text{пд}}, \Psi_i^{\text{пс}}$ – измерения псевдоскоростей и псевдодальностей i -го спутника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), Δf – уход частоты опорного генератора, γ – уход времени ($\Delta f, \varphi, \Psi_i^{\text{пд}}, \Psi_i^{\text{пс}}$) (необходимы при использовании бортовых источников навигации по измерениям ГНСС).

Таким образом, с помощью фундаментального виртуального пространства обеспечена возможность общего описания модели действующих КА в виде наблюдаемой, управляемой, стохастической динамической системы (14), в которой можно будет определить для каждого КА адекватную модель движения на интервале моделирования $[t_0, t)$.

$$S_{DS}^u = \{T, \bar{x}, M(x), \bar{u}, U, Q_0(\bar{x}_0, t_0, \varphi[t_0, t], f(\phi, t, n), t)\}, \quad (14)$$

где T – множество моментов времени ($T \in \mathcal{R}$), t , в которые реализуется процесс, $\bar{x} = \|x_1, x_2, \dots, x_m\|$ – вектор, параметры которого определяют состояние процесса, $M(x)$ – множество возможных состояний процесса, \bar{u} – вектор управления, определенный на множестве возможных управлений U , $Q_0(\bar{x}_0, t_0, \varphi[t_0, t], f(\phi, t, n), t)$ – оператор перехода во множестве состояний процесса X , действующий на момент $t \geq t_0$, $\varphi[t_0, t)$ – множество векторов управления на полуинтервале $[t_0, t)$, $f(\phi, t, n)$ – параметры модели прогнозирования положения центра масс, определенные на множестве фундаментального виртуального пространства F . С помощью данной модели, путем обнуления функций управления \bar{u} можно моделировать движение оставшихся на орбите неуправляемых КА, а также космического мусора.

Определим параметры модели движения S_{DS}^u для i -го КА, состоящего в космической системе O , на полуинтервале $[t_0, t)$, тогда

$$(S_{DS}^u)^i = \{(\bar{x}_0, \bar{u}_0, Q_0(\bar{x}_0, t_0, \varphi[t_0, t], f(\phi_i, t, n_i), t)\}, \quad (15)$$

В рассмотренном случае $(S_{DS}^u)^i$ можно назвать оперативным виртуальным пространством КА ^{i} .

Для каждого конкретного КА или космического объекта функция $f(\phi_i, t, n_i)$ может быть определена в виде системы дифференциальных уравнений в инерциальной системе координат.

С помощью оперативного виртуального пространства каждого КА, входящего в космическую систему, можно определить оперативное виртуальное пространство космической системы в целом O .

$$O = \{(S_{DS}^u)^0, \dots (S_{DS}^u)^i\}, \quad (16)$$

Таким образом, с помощью фундаментального виртуального пространства, а также общего описания баллистических моделей КА и космических объектов можно построить единое, самонастраиваемое, адекватное (на интервале моделирования) баллистическое информационное пространство, включающее в себя модели всех зарегистрированных космических объектов в ОКП.

Система планирования процессов БНО управления многоспутниковыми КА ДЗЗ

Баллистико-навигационное обеспечение полета КА подразумевает решение ряда задач, регламентируемых циклограммой полета, выполняемых в условиях жестких ограничений на оперативность. При планировании баллистических расчетов необходимо учитывать множество исходных данных, которые отражаются в плане полёта. Обеспечение выполнения данной процедуры сопровождается требованием максимальной надёжности, поскольку ошибки в составлении плана могут привести к негативным последствиям. Исходя из этого, в работе по составлению плана присутствует значительная доля «ручного» труда. Наличие данного фактора, при всей необходимости участия человека в составлении плана, имеет свои недостатки, а именно: низкая производительность труда при выполнении работы оператором, наличие «человеческого фактора», который возникает во время выполнения рутинных, монотонных операций и приводит к появлению ошибок.

Учитывая, что планирование решения задач БНО управления полетом можно условно отнести к задаче классификации или отнесения объекта к одному из нескольких попарно не пересекающихся множеств, что является одним из важнейших применений нейронных сетей, было принято решение о построении системы планирования процессов БНО управления многоспутниковыми КА ДЗЗ на основе нейронной сети прямого распространения.

Для оценки необходимости были выбраны следующие критерии, на основании анализа которых принимается решение об уточнении параметров движения:

- 1) поступление заявок для расчета баллистических форм и СБИ;
- 2) интервал новых измерений (рассматриваются значения от 0 до 4 витков);

3) изменение индекса геомагнитной активности атмосферы (рассматривается изменение индексов относительно предыдущего решения задачи в процентах);

4) интервал времени после последнего уточнения параметров орбиты (рассматривается интервал от 0 до 3 суток);

5) сообщение об опасном сближении КА с объектом космического мусора;

6) проведение расчетов для обеспечения динамических операций;

7) проведение динамической операции в текущие сутки.

Для формирования входных параметров обучающей выборки были рассмотрены типовые планы для управления КА на интервале 2 месяца.

Экспериментальным путем была выбрана структура нейросети, состоящая из входного слоя, двух скрытых слоев и выходного слоя нейронов. Входной слой включает 7 нейронов, что соответствует числу критериев, выбранных для принятия решения о необходимости решения задачи. Выходной слой содержит один нейрон, поскольку ответ сети представляет собой значение булевого типа (т.е. выполнять задачу по определению орбиты КА или нет).

Для валидации работы сети был подготовлен набор данных с заданными входными параметрами нейросети, не включенными в обучающую выборку. Впоследствии проводилась сравнительная оценка выходного сигнала сети и решения, которое принял бы оператор, на основании имеющихся исходных данных. В результате анализа использования нейросетевых технологий при планировании процессов БНО управления полетами, показано, что обученная нейросеть на тестовых данных демонстрирует совпадение выходного сигнала с решением, которое принял бы оператор-баллистик, анализируя исходную информацию.

Следующей необходимой составляющей системы планирования процессов БНО управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ является алгоритм контроля выполнения задач БНО управления полетами КА ДЗЗ. В данном случае представляется возможным контроль выполненных расчетов при реализации плана как со стороны настроек критериев решения задач, так и со стороны оператора-балластика. Например, для задачи определения орбиты могут быть заданы ограничения на изменение элементов орбиты КА относительно исходных начальных условий, если на данном временном интервале не планировалось выполнение коррекций орбиты или маневров уклонения от космического мусора.

Методика поддержания баллистической структуры многоспутниковой космической системы ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом.

Для решения задачи сокращения числа проводимых коррекций орбиты КА с целью поддержания баллистического построения КС предлагается отказаться от жесткого

поддержания баллистической структуры КС в заданных интервалах элементов орбиты (T_k , h , e , ω , Ω) каждого КА и перейти к проведению коррекций исходя из анализа возможности решения целевых задач многоспутниковой КС в целом, например, периодичности наблюдения для КС ДЗЗ. Под периодичностью наблюдения точечной цели обычно понимается интервал между ее последовательными наблюдениями. Периодичность наблюдения является сложной, нелинейной функцией, зависящей как от расположения точки на поверхности Земли, так и от витка орбиты спутника. Если же речь идет о наблюдении целого района, то периодичность наблюдения можно толковать как квазислучайную величину, зависящую, с одной стороны, от конкретной точки заданного района, а с другой стороны, от интервала времени на котором происходит наблюдение.

Для расчета данных показателей был разработан алгоритм расчета системного эффекта. Зададим район наблюдения с помощью его границ: $\{\varphi^{\text{ю}}, \varphi^{\text{с}}, \lambda^{\text{з}}, \lambda^{\text{в}}\}$, а также параметры аппаратуры наблюдения – углы обзора $\gamma^{\text{лев}}, \gamma^{\text{прав}}$ (рисунок 6). Полоса обзора аппаратуры наблюдения ограничена геоцентрическим углом φ , который отсчитывается от подспутниковой точки ($\varphi_z=0$).

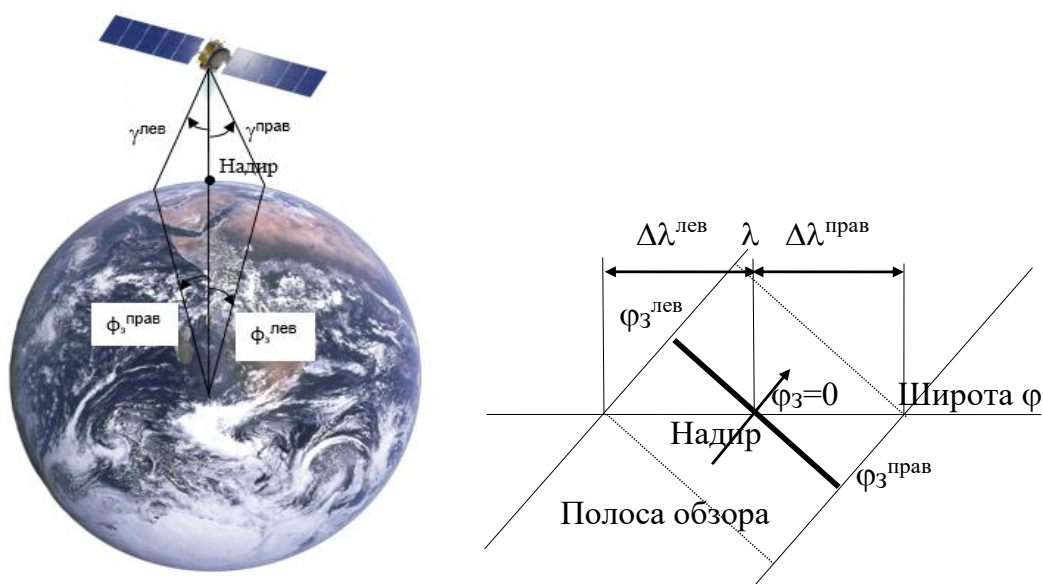


Рисунок 6– Полоса обзора аппаратуры

Будем считать, что точка земной поверхности с координатами $\{\varphi, \lambda\}$ накрывается на широте φ зоной обзора, если на этой широте выполняется условие $\lambda(\phi_3^{\text{лев}}) \leq \lambda \leq \lambda(\phi_3^{\text{прав}})$

Алгоритм расчета периодичности наблюдения сводится к следующему:

1) определяются связанные с подспутниковой точкой координаты зоны обзора аппаратуры для первого витка орбиты. Для этого сначала вычисляют долготу подспутниковой точки λ , расположенной на широте φ , используя уравнения трассы:

$$\lambda = \Omega + \arctg(\operatorname{tg} u \cdot \cos i) - S + \Delta\Omega \frac{t}{T}, \quad (18)$$

$$\varphi = \arcsin(\sin u \cdot \sin i), \quad (19)$$

где $S = S_0 + \omega_3(t - t_{S_0})$ – звездное время на гринвичском меридиане,

S_0 – звездное время в некоторую гринвичскую полночь, t_{S_0} – время наступления этой

полуночи, t – текущее время полета, i – наклонение орбиты, u – аргумент широты,

$\omega_3 = 7,29211 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли, $\Delta\Omega$ – прецессия узла орбиты за один оборот, вызванная несферичностью Земли, для круговой орбиты

$$\Delta\Omega = - \frac{3 \cdot \cos i \cdot R_e^2 \cdot J_2 \cdot \omega}{2(a(1-e^2))^2}, \quad (20)$$

где, J_2 – второй динамический коэффициент формы сжатия Земли, ω – угловая скорость движения КА, e – эксцентриситет орбиты, a – большая полуось.

2) Определяются границы полосы обзора:

$$\lambda[\varphi_3^{\text{лев}}(u)] = \lambda - \Delta\lambda[\varphi_3^{\text{лев}}(u)], \quad (21)$$

$$\lambda[\varphi_3^{\text{пр}}(u)] = \lambda + \Delta\lambda[\varphi_3^{\text{пр}}(u)]. \quad (22)$$

3) С некоторым шагом интегрирования рассчитываются прогнозные значения координат подспутниковых точек.

4) Производится перебор всех точек района наблюдения с координатами $\{\lambda, \varphi\}$ с некоторым шагом. Для каждой широты φ определяются координаты крайних точек полосы. Для каждого КА определяется последовательность витков, в которой трассы КА проходят по каждой широте района наблюдения. В том же порядке располагаются и границы зон обзора, каждой из них соответствует время $t_i = [T \cdot (n_i + \frac{u}{360})]$ покрытия данной точки $\{\lambda, \varphi\}$, где T – период обращения орбиты данного спутника, n_i – номер витка, u – аргумент широты спутника, зоной обзора которого накрывается точка $\{\lambda, \varphi\}$.

5) Для каждой точки $\{\lambda, \varphi\}$, определяются моменты ее наблюдения $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, где m – число моментов наблюдений всеми спутниками в группировке. Моменты наблюдения фильтруются исходя из ограничений по возможности проведения съемок, затем вычисляются интервалы времени между последовательными наблюдениями $\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_{(m+1)}\}$.

б) Определяются минимальное, максимальное и среднее время между наблюдениями данной точки $\{\lambda, \varphi\}$.

$$\Delta t^{\min} = \min_i \Delta t_i, \Delta t^{\max} = \max_i \Delta t_i, M[\Delta t] = \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^{m+1} \Delta t_i \quad (23)$$

Расчеты выполняются для всех точек заданного района с некоторым шагом. Весь диапазон оценок периодичности наблюдения t_θ разбивается на M одинаковых интервалов, и для каждого интервала, т.е. значения периодичности наблюдения t_{θ_m} , $m=1,2,\dots,M$, определяется то, что значение оценки периодичности t_{θ_m} (минимума, максимума или выборочного среднего) на этом интервале не хуже заданного значения t^*_m .

Также разработан алгоритм для расчета необходимого числа коррекций орбиты КА для поддержания характеристик решения целевых задач многоспутниковой КС ДЗЗ. На его основе единого баллистического информационного пространства определим модель КА, входящих в многоспутниковую космическую систему, в виде наблюдаемой, управляемой, стохастической динамической системы:

$$S_{DS}^u = \{\psi_R, \psi_U, \psi_B, \psi_Q, \psi_K, \psi_N\}, \quad (24)$$

где $\psi_R: R \rightarrow \bar{r}_0$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА начальные условия движения центра масс, R – непрерывное множество векторов состояния КА;

$\psi_U: U \rightarrow f(\varepsilon, \alpha)$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА характеристики его бортовой целевой аппаратуры (ε – угол полураствора целевой аппаратуры, α – максимальный угол отклонения от надира), U – множество характеристик целевой аппаратуры КА;

$\psi_B: B \rightarrow f(n, \Delta \bar{r})$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА правила проведения сеансов связи с НКУ, B – множество правил, определяющих необходимость проведения сеансов связи с НКУ, n – множество источников навигационной информации, $\Delta \bar{r}$ – максимально возможное рассогласование между векторами состояния (прогноznым и полученным по результатам измерений);

$\psi_Q: Q \rightarrow f(q, t, n)$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА модель возмущающих факторов, действующих на КА в полете, $f(q, t, n)$ – параметры модели прогнозирования положения центра масс, определенные на множестве возмущающих факторов, действующих на КА (Q), ϕ – правые части дифференциальных уравнений движения центра масс;

$\psi_k: K \rightarrow \{k_1, k_2 \dots k_n\}$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА набор задач БНО управления полетами, k_n – отдельная задача БНО управления полетами, K – множество задач БНО управления полетом КА;

$\psi_N: N \rightarrow \{n_1, n_2 \dots n_n\}$ отображение, ставящее в соответствие каждому КА набор наземных станций управления полетом.

Таким образом, модель многоспутниковой КС относительно решения задач БНО может быть определена как множество моделей КА, входящих в систему:

$$Cons = \{(S_{DS}^u)_1, (S_{DS}^u)_2 \dots (S_{DS}^u)_n\}, \quad (25)$$

где n – число КА в многоспутниковой КС.

Определим модель решения целевых задач КС. Введем отображение $\psi_\theta: E \rightarrow t_\theta(\gamma, \varphi)$, включающее оценку периодичности районов наблюдений исходя из заданного баллистического построения КС, где, $t_\theta(\gamma, \varphi)$ функция, ставящая в соответствие каждому району наблюдения с координатами $(\gamma, \varphi) \in E$, оценки периодичности наблюдения космической системы в соответствии с представленным в настоящей статье алгоритмом, E – множество районов наблюдения. Таким образом, можно определить условие решения целевых задач многоспутниковой космической системой за счет своего баллистического построения, как:

$$\{\forall t_{\theta i} \in \psi_\theta | t_{\theta i} \geq t_{mi}^*\} \quad (26)$$

где, t_{mi}^* – заданная оценка периодичности наблюдения для конкретного района.

Следовательно, если не выполняется условие (19), то необходимо проведение коррекций орбит тех КА, которые негативно влияют на общий показатель оценки периодичности наблюдения заданного района. Таким образом, можно определить число коррекций $N_{\Delta V}$, необходимых для поддержания многоспутниковой космической системой заданного значения периодичности наблюдения t_{mi}^* на заданном интервале времени.

$$N_{\Delta V} = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^n \Delta V_{i,j} \quad (27)$$

где $\Delta V_{i,j} = f(Cons, \psi_\theta, t_{mi}^*)$ – число коррекций, i – номер КА в космической системе, j – номер коррекции i -го КА.

Шестая глава посвящена комплексному моделированию процессов БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП с помощью разработанного метода.

Основная задача комплексного моделирования – демонстрация практической реализуемости предлагаемого метода, а также оценка его эффективности по сравнению с существующими подходами по критериям минимизации числа маневров, необходимых для

поддержания баллистической структуры КС ДЗЗ, а также времени решения задач БНО управления полетами многоспутниковой КС ДЗЗ из единого центра без увеличения привлекаемых к решению вышеперечисленных задач ресурсов.

Задача комплексного моделирования процессов БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ в условиях техногенного засорения ОКП выполнена в два этапа. На первом этапе моделирования с помощью методики поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ производилась оценка количества маневров, необходимых для поддержания периодичности обзора отдельных районов многоспутниковой КС ДЗЗ (системного эффекта).

На втором этапе моделирования в соответствии с результатами по числу маневров, необходимых для поддержания системного эффекта, а также в соответствии с исходными данными о типовых задачах БНО управления КС с помощью метода Монте-Карло были составлены 1000 вариантов циклограмм работы службы БНО на сутки с учетом необходимости периодического выполнения маневров поддержания системного эффекта. Для учета необходимости выполнения маневров уклонения (наряду с проведением штатных маневров поддержания системного эффекта многоспутниковой космической системы) случайным образом в циклограммы работы службы БНО на сутки добавлялась периодическая необходимость проведения маневров уклонения. Так как к настоящему времени отечественные космические системы практически не проводят маневры уклонения, статистика по проведению таких маневров была взята в отчете об обеспечении безопасности функционирования многоспутниковой КС связи «Starlink».

Расчет максимального значения числа коррекций для поддержания системного эффекта от избыточности баллистической структуры многоспутниковых космических систем ДЗЗ

В качестве опорной многоспутниковой КС, для которой проводился расчет максимального значения числа коррекций для поддержания системного эффекта, была выбрана многоспутниковая КС ДЗЗ, состоящая из 112 КА, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах, но с различными параметрами орбиты.

При моделировании рассматривалась периодичность наблюдения трех районов Российской Федерации, лежащих на северной и южной границе, а также в центре страны (рис. 7). Кроме того, из-за особенностей проведения съемки в видимом диапазоне частот дополнительно были введены ограничения на съемку заданных районов только днем. В результате моделирования было выявлено, что периодичность наблюдения района 1 (t_{m1}^*) составляет 1-2 раза в сутки и не ухудшается на протяжении 20 дней. Периодичность

наблюдения района 2 (t_{m2}^*) составляет порядка 1 раза в трое суток и не ухудшается на протяжении 30 дней. Периодичность наблюдения (t_{m3}^*) района 3 составила порядка 1 раза в трое суток и ухудшается через 7 дней. Исходя из проведенного анализа, для того, чтобы оценить максимальное число коррекций КА для поддержания заданного значения периодичности наблюдения рассматривался район №3.

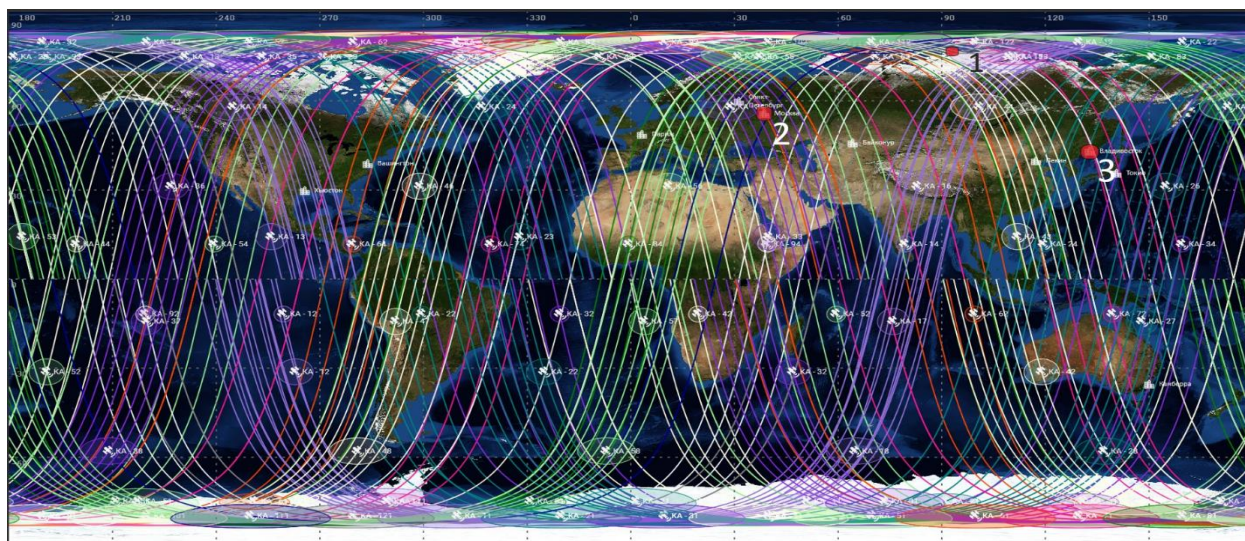


Рисунок 7 – Визуализация процесса моделирования

В результате, для этого района с помощью предлагаемого метода были рассчитаны интервалы проведения коррекций для удержания заданной периодичности наблюдения района №3 (t_{m3}^*) с учетом сохранения периодичности наблюдения остальных районов на интервале в 1 год. Расчет коррекций проводился в импульсной постановке без учета длительности выдачи импульса. В соответствии с проведенными расчётами периодичность съемок района номер 3 составила минимум 1 раз в 3-е суток для рассматриваемого периода времени наблюдения. Для того, чтобы обеспечить сохранение такой периодичности, необходимо обеспечить съемку района № 3 на 11, 14, 17 и т.д. сутки месяца, для которых происходило моделирование. Для обеспечения съемки на 11 число были найдены КА (№23, №24, №36, №39,), трассы которых проходят достаточно близко от района № 3 в заданный промежуток времени. Из данных КА, исходя из условия минимизации необходимого корректирующего импульса, был выбран КА №24 со следующими параметрами орбиты: драконический период обращения $T_\Omega = 96.880172$ мин., эксцентриситет $e = 0.000585$, наклонение $i = 98.05$ град, большая полуось $a = 6987.418912$ км, аргумент перигея $\omega = 360$ град. С целью минимизации величины маневра были рассмотрены различные варианты, например, проведение коррекции 5 числа после проведения съемок района №3 и проведение коррекции 10-го числа для обеспечения проведения съемок на следующий день. Если коррекцию проводить 05.08.2024 в 11:06:51 после того, как аппарат выйдет на границу

обзора, величина импульса составит $\Delta V = 0.011$ м/с. Данная величина вернет аппарат №24 к номинальной орбите по высоте. В результате проведения данной коррекции район №3 будет наблюдаться 06.08.2024, 07.08.2024 и 08.08.2024, далее необходимо будет проводить коррекцию еще раз. Все вышеуказанные расчеты были проведены для всех трех районов наблюдения с учетом особенностей рассматриваемой многоспутниковой КС ДЗЗ, состоящей из 112 КА, на интервале в 1 год. Также к полученным результатам случайным образом были добавлены маневры уклонения от космического мусора.

Результаты анализа полученных данных показали нелинейность распределения коррекций орбиты как по дням, так и по количеству корректируемых КА, что обуславливается неоднородностью рассматриваемой космической системы. Кроме того, с помощью метода Монте-Карло было проведено численное моделирование различных случайных вариантов распределения возмущающих факторов, в результате чего наихудшая оценка общего числа маневров $N_{Z\Delta V}$, необходимых для поддержания заданного значения периодичности наблюдения t_m^* , составила менее 500 в год, даже с учётом необходимости проведения маневров уклонения (рисунок 8). Данный результат более чем в два раза меньше, чем необходимое число маневров жесткого поддержания баллистической структуры КС.

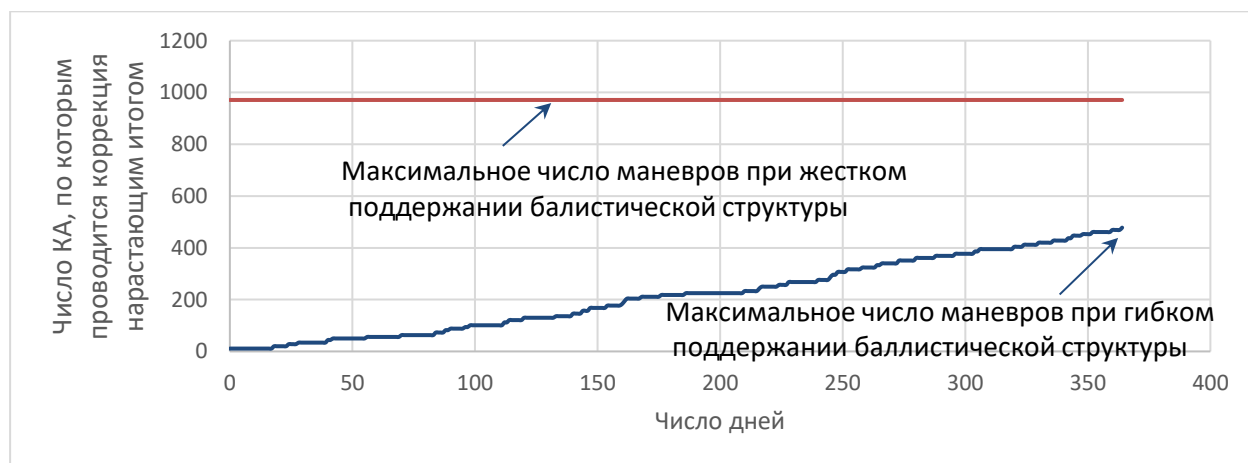


Рисунок 8 – Общее число коррекций в год с учетом поддержания СЭ

Расчет времени решения задач БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ с учетом техногенного засорения ОКП

Основным показателем, определяющим возможность использования предложенного метода для оперативного БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ, является время, необходимое для проведения различных комбинаций суточных баллистических расчётов на существующих АРМ.

Для проведения данных исследований рассматривалась аналогичная многоспутниковая КС ДЗЗ, состоящая из КА 112 КА С помощью автоматизированной

системы планирования методом Монте-Карло генерируются 1000 различных комбинаций задач, решаемых для БНО управления многоспутниковой КС ДЗЗ, на текущие сутки полета. Далее с помощью единого баллистического информационного пространства происходит решение сгенерированных баллистических задач, после чего результаты расчетов отправляются на автоматическую проверку в блок формирования и проверки результатов вычислений. По мере прогнозирования движения центра масс КА с помощью методики поддержания баллистической структуры многоспутниковых КС ДЗЗ, с учетом решения целевых задач системой в целом, формируются заявки на проведения маневров, которые подаются в блок формирования планов маневров. В том же блоке случайным образом (дискретное равномерное распределение) генерируются заявки на проведение маневров уклонения от космических объектов. Затем данные заявки поступают в блок формирования плана расчетов на сутки и отрабатываются по аналогии с другими баллистическими задачами.

После проверки корректности проведения всех расчетов для каждого варианта на каждые сутки в блоке формирования выходной информации формируется оценка времени, затраченного на проведение баллистических расчетов. Для учета времени, необходимого для парирования нештатных ситуаций, в соответствии с эксплуатационной документацией, регламентирующей максимальное время, необходимое для устранения расчетной НШС не более 5 минут, ко времени, затраченному на выполнение каждой задачи, случайным образом добавлялось время в интервале от 60 до 300 секунд.

Результаты вычисления времени, затраченного на организацию и выполнение задач БНО управления рассматриваемой многоспутниковой КС ДЗЗ, представлен на рисунке 9.

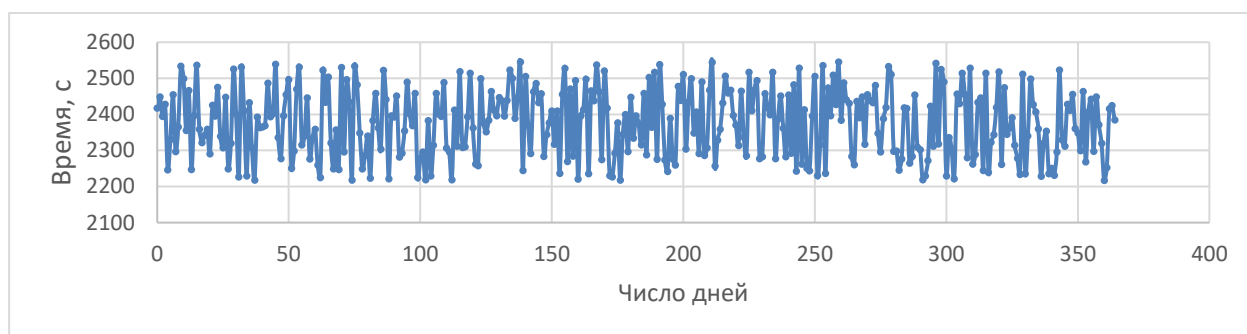


Рисунок 9 – Время, необходимое для решения задач БНО управления

На представленном рисунке показан результат оценки времени для проведения расчетов одного из 1000 смоделированных вариантов распределения задач БНО управления полетами на каждые сутки на интервале в 365 дней. Неравномерность распределения времени проведения вычислений характеризуется необходимостью проведения периодических коррекций орбит КА для поддержания численных показателей решения

целевых задач системой в целом, неравномерностью распределения возмущающих факторов, действующих на КА, функционирующих на различных орбитах, а также необходимостью периодических проведения маневров уклонений. При моделировании был выбран наихудший случай аппроксимации произвольного распределения равномерным, что позволяет утверждать, что результаты моделирования при применении любых управляющих воздействий будут в реальности не хуже полученных на равномерном распределении.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода БНО управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ, на рисунке 10 приведено сравнение времени для проведения баллистических расчетов при использовании существующих подходов и предлагаемого метода.

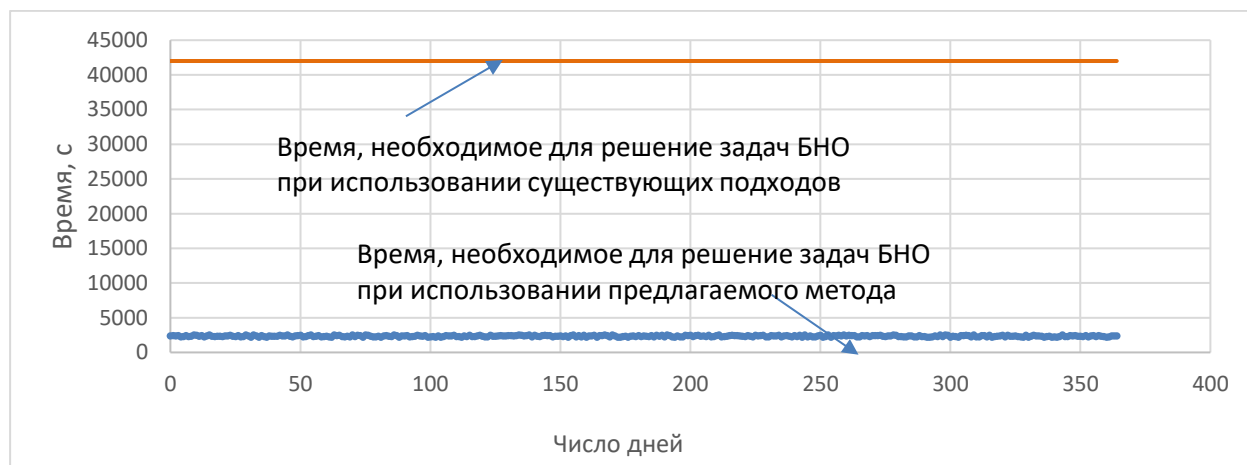


Рисунок 10 – Время, необходимое для решения задач БНО управления многоспутниковой КС ДЗЗ

Результаты моделирования показали, что в целом верхняя оценка необходимого времени для проведения баллистических расчётов составляет чуть менее 45 минут для рассматриваемой многоспутниковой КС, а результаты аналогичного моделирования при использовании существующих подходов показали, что для проведения всех баллистических расчетов на сутки необходимо порядка 11.7 часов. Исходя из этого, можно сделать вывод о высокой эффективности предлагаемого метода и возможности его использования при оперативном управлении полетами многоспутниковых КС ДЗЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе были рассмотрены вопросы разработки метода решения актуальной научной проблемы БНО управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ, функционирующих в условиях техногенного засорения ОКП, из единого центра с учетом имеющихся ограничений на использование существующих ресурсов (вычислительных, измерительных, связных, инфраструктурных и др.), а также

были представлены новые технические решения, внедрение которых имеет существенное значение для развития отечественных КС ДЗЗ.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. В интересах решения поставленной научной проблемы впервые была проведена декомпозиция процессов БНО космических систем ДЗЗ, включающих разнородные КА.

2. Разработана, обладающая новизной, комплексная математическая модель БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ, включающая в свой состав следующие взаимосвязанные математические модели: модели орбитального движения КА, модель определения параметров орбиты КА, модель планирования процессов БНО управления полетами, модель расчета системного эффекта при решении целевых задач многоспутниковой КС, модели проведения орбитальных коррекций.

3. Впервые проведен комплексный анализ возможности использования существующих подходов, использующихся при БНО управления КС, состоящих из нескольких десятков КА, для управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ. Обоснованы объективные критерии оценки возможности использования существующих подходов к решению задач БНО управления полетами многоспутниковых КС ДЗЗ, а именно: время, необходимое для проведения всех баллистических расчетов, на текущие сутки и число АРМ операторов-баллистиков, необходимых для оперативного решения задач БНО.

4. Разработана методика построения единого баллистического информационного пространства, позволяющего осуществлять моделирование орбитального движения КА, функционирующих на различных орбитах, имеющих различный состав источников навигационных измерений, различную точность определения орбит, время автономного существования, а также различные характеристики целевой аппаратуры, в единой среде моделирования.

5. Разработана методика построения системы планирования процессов БНО управления полетами, позволяющая в автоматизированном режиме создавать планы проведения баллистических расчетов на различные интервалы времени, обеспечивать связь созданных планов с конкретными вычислительными задачами, а также отслеживать их выполнение, проводить предварительную оценку правильности решения баллистических задач.

6. Разработана методика поддержания баллистической структуры многоспутниковой КС ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой в целом,

позволяющая существенно сократить общее число маневров, проводимых КА, по сравнению с существующими подходами.

7. Предложен метод и обоснована принципиальная возможность создания автоматизированной системы БНО управления многоспутниковой КС ДЗЗ.

8. На основании результатов исследований и характеристик разработанных методик и алгоритмов, которые вошли в предлагаемый метод БНО управления полетом многоспутниковых КС ДЗЗ, сделан вывод о реализуемости предложенных подходов при управлении многоспутниковыми КС ДЗЗ из единого центра с учетом всех рассмотренных ограничений.

9. В рамках практической реализации метода БНО управления многоспутниковыми КС ДЗЗ предложен технический облик нового информационно-вычислительного комплекса для решения полного цикла задач БНО управления полетами посредством программной реализации единого баллистического информационного пространства, автоматизированной системы планирования процессов БНО управления многоспутниковыми космическими системами ДЗЗ и методики поддержания баллистической структуры многоспутниковой космической системы ДЗЗ.

Все результаты были подтверждены в ходе экспериментальной отработки. В качестве исходных данных были использованы сведения о существующих и планируемых к развёртыванию космических системах, а также данные о предполагающихся технологических циклах управления и привлекаемых наземных измерительных пунктов для осуществления управления.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК:

1. Кутоманов А.Ю., Гордиенко В.А., Грудин Д.В., Матюшин М.М., Паненко В.С., Усиков С.Б. Особенности реализации баллистического построения и поддержания орбитальной структуры в космической системе "Канопус-В" // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2020. № 5 (116). С. 64-77

2. Кутоманов А.Ю., Кудрявцев С.И., Метод и алгоритм оптимизации участка торможения при сходе с орбиты автоматических КА с низкой тяговооруженностью. // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2016. № 1(86). С 27-34.

3. Кутоманов А.Ю., Кудрявцев С.И. Результаты анализа реальной работоспособности АСН по информации от различных КА применительно к разработке системы высокоточного управления спуском перспективного пилотируемого космического

корабля // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2015. №4 (83). С.142-147.

4. Кутоманов А.Ю. Оптимизация алгоритмов организации баллистико-навигационного обеспечения в условиях управления большим количеством космических аппаратов // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2015. №3. С. 118-125.

5. Кутоманов А.Ю., Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сиранчук Д.С. Основные мероприятия по совершенствованию центра ситуационного анализа, координации и планирования в условиях наращивания орбитальной группировки космических аппаратов // Научно-технический журнал Космическая техника и технологии 2022. № 3 (38). С. 16-28.

6. Кутоманов А.Ю., Ермолаев С.В., Кустодов А.Ю., Смирнова Е.Д. Перспективные программные средства моделирования и визуализации орбитального движения для оперативного баллистико-навигационного обеспечения управления полетом космических аппаратов и космических систем // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2022. № 3 (126). С. 5-16.

7. Кутоманов А.Ю., Ермолаев С.В., Кустодов А.Ю., Смирнова Е.Д., Никитина Е.Б. Автоматизированная система операционно-временного планирования и контроля решения задач баллистико-навигационного обеспечения для управления полётами многоспутниковых группировок // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение 2023. № 2 (131). С. 30-40.

8. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Кустодов А.Ю. «Проблема организации баллистико-навигационного обеспечения управления полетами многоспутниковых космических систем ДЗЗ» // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2023. №3 (132), С. 8-19.

9. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Кустодов А.Ю. Основные подходы к созданию единого баллистического информационного пространства моделирования движения разнородных космических аппаратов и космических систем // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2022. №5 (128). С. 5-17.

10. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Кустодов А.Ю., Паненко В.С. Исследование возможности оперативного использования оптических средств в качестве дополнительных источников навигационной информации для обеспечения управления полетами постоянно расширяющейся орбитальной группировкой // Космонавтика и ракетостроение 2020. № 1 (112). С. 14-26

11. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Павлова Е.А. Анализ Российских и зарубежных подходов к организации управления космическим движением // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2022. № 1 (124). С. 5-17.

12. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Котеля В.В., Иванов А.А. Анализ путей повышения эффективности управления космическими аппаратами различного целевого назначения за счет унификации и интеграции средств управления полетом // Инженерный журнал «Наука и инновации» 2021. № 11 (119).

13. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Кустодов А.Ю., Спасенихина Е.Ю. Метод проведения коррекций орбит КА многоспутниковых космических систем ДЗЗ с учетом решения целевых задач системой // Научно-технический журнал Космонавтика и ракетостроение, 2024. № 4 (137). С. 5-19.

14. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Дудко А.Н., Сохранный Е.П., Донсков А.В., Сиранчук Д.С. Способ планирования задействования наземных средств управления космическими аппаратами на основе приоритетов запросов // Научно-технический журнал Космическая техника и технологии 2025. № 2 (49). С. 117-133.

15. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Рудакова О.В., Тараканов О.В. Методика оценки эффективности баз данных // Динамика сложных систем XXI век, 2025. Т. 19. № 3. С. 26-43.

Статьи в журналах, индексируемых в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. Кутоманов А.Ю., Галузин В.А., Матюшин М.М., Скобелев П.О. Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем // Научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление». 2020. Т. 21. № 11. С. 639-650.

2. Kutomanov A.Yu., Matushin M.M. Use of network approaches to solve tasks of ballistic and navigation support for large-scale space systems mission control // AIP Conference Proceedings. 44. Сер. "XLIV Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists - Pioneers of Space Exploration" 2021. С. 110007.

3. Kutomanov A., Stokes H., Akahoshi Y., Bonnal C., Destefanis R., Gu Y., Kato A., LaCroix A., Lemmens S., Lohvynenko A., Oltrogge D., Omaly P., Opiela J., Quan H., Sato K., Sorge M., Tang M. Evolution OF ISO`S space debris mitigation standarts // Journal of Space Safety Engineering. 2020. Т. 7. № 3. С. 325-331.