

На правах рукописи



Старков Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЦЕЛЕВОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Автореферат
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2019

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

Научный консультант **Малышев Вениамин Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» МАИ

Официальные оппоненты: **Баранов Андрей Анатольевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Кузнецов Алексей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора НИИ обработки аэрокосмических изображений федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный технический университет имени В.Ф. Уткина»

Салмин Вадим Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космического машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация **Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»** 141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская д. 24

Защита состоится «26» декабря 2019 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/doctor/index.php?ELEMENT_ID=107643

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.12, д.т.н., профессор



В.Н. Евдокименков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из ключевых элементов космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является единая территориально-распределенная информационная система (ЕТРИС), предназначенная для создания и распространения по заявкам потребителей информационных продуктов, которые производятся на базе информации дистанционного зондирования, получаемой с помощью целевой аппаратуры космических аппаратов (КА) входящих в различные орбитальные группировки (ОГ). Она представляет собой сложную организационно-техническую систему, в которой функционирует множество объектов. Упорядоченные процессы взаимодействия объектов друг с другом образуют автоматизированный технологический процесс создания космических снимков, их многоступенчатой обработки, хранения и распространения.

Под потоком целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ в работе понимается последовательное выполнение этапов приема, передачи и обработки информации, с учетом специальных правил и перенос их результатов от источника к потребителю, конечной целью которого является создание готового тематического продукта.

Наращивание орбитальной группировки КА ДЗЗ и увеличение ее производительности обуславливает значительное увеличение объемов принимаемых и обрабатываемых в системе данных. В этой связи возникает необходимость построения оптимальной наземной космической инфраструктуры (НКИ) в части приема, обработки, хранения и распространения данных ДЗЗ. Важнейшим условием при этом становится создание современных комплексов приёма данных с КА ДЗЗ на основе разработки совместимых между собой семейств унифицированных компонентов, а также создание комплексов обработки и хранения информации с использованием современных технологий вычислений. Очевидно, что в отмеченных условиях существующий традиционный путь создания и использования наземных средств по-отдельности, в рамках каждой разрабатываемой космической системы приведёт к нерациональному расходованию ресурсов, дублированию при создании аппаратно-программных средств, отсутствию технической, информационной и организационной совместимости.

Кроме того, возможности наземных центров обработки информации при существующем подходе к организации технологических процессов с учётом сложившегося к настоящему времени разрозненного порядка создания наземных комплексов ДЗЗ и состоянии инфраструктуры приёма, обработки и доведения данных ДЗЗ до потребителей показывают исчерпанность применяющихся научных подходов к обеспечению конкурентоспособных уровней производительности и оперативности технологических процессов ДЗЗ. Данное обстоятельство требует выработки новых системных и прикладных решений.

Таким образом, вопрос поиска новых решений важной научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, как единой информационной системы является актуальной и практически важной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В.Т. Бобронниковым, А.А. Емельяновым, К.А. Заниным, Е.А. Лупян, Л.А. Макриденко, В.В. Малышевым, О.П. Нестеренко, Ю.И. Носенко, Ю.Н. Разумным, Г.Г. Райкуновым, Н.Н. Севастьяновым, В.А. Селиным, Ю.А. Смольяниновым и др., позволил определить основные особенности построения и функционирования систем ДЗЗ с точки зрения создания готовых информационных продуктов, а также путей исследований, направленных на определение общих принципов и методов решения поставленной задачи.

В работах этих и других авторов излагались теоретические основы и подходы к построению сложных информационных систем ДЗЗ, исследовались модели движения и принципы управления КА, работа целевой аппаратуры и служебных систем, обработка данных ДЗЗ. Вместе с тем, в настоящее время появилась объективная возможность совершенствования существующей единой территориально-распределенной системы ДЗЗ на базе имеющихся и строящихся центров сбора, обработки и распространения спутниковых данных. В рамках этой системы появился целый ряд нерешенных новых проблем, в частности, связанных с решением задачи распределения в ней больших потоков целевой информации.

Объект исследования

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается космическая система дистанционного зондирования Земли как единая территориально-распределенная информационная система, одной из главных задач которой является предоставление потребителю готового информационного продукта.

Предмет исследования

Методика, математические и программные средства распределения потоков целевой информации при функционировании системы ДЗЗ, как сложной информационной системы, являются предметом исследования данной диссертационной работы.

Цели и задачи диссертационной работы

Данная работа направлена на формирование методики, теоретического и прикладного задела для решения проблемы организации эффективной работы со сверхбольшими, постоянно растущими объёмами информации в системе ДЗЗ, требующими сложной специализированной обработки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **научно-технические задачи**:

1. Проводится системный анализ и формализация задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как сложной информационной системы. Выявляются требующие дальнейшей формализации основные объекты и рабочие процессы системы.

1. Проводится анализ и формируются показатели эффективности, формулируется техническая постановка задачи.

2. Формулируется математическая постановка, разрабатывается методический подход к решению и условия применимости задачи оптимизации распределения потоков целевой информации.

3. Разрабатывается система взаимосвязанных математических моделей функционирования составных частей космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы: модели заявки потребителя; модели наземного комплекса приема, обработки и распределения информации (НКПОР); модели орбитальной группировки, включая модели: эволюции орбит КА ДЗЗ, стратегии коррекций, съемки наземных объектов и организации сеансов связи; модели линий передачи целевой информации между элементами системы.

4. Определяются принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса.

Научная новизна

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

1. Впервые предложено рассматривать задачу управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ как новую, единую задачу распределения процессов ее обработки по элементам космической и наземной инфраструктуры;

2. Обосновано объективное свертывание вектора разнородных показателей эффективности и переход к частным показателям типа «оперативность-стоимость»;

3. Впервые сформировано единое представление математической модели элементов системы как функции преобразования объема входной информации в объем выходной информации при наличии ограничений.

4. Впервые обоснована возможность сведения задачи распределения процессов обработки информации по элементам космической и наземной инфраструктуры к задаче одно или двухкритериальной оптимизации с поиском решения на графе.

5. Предложены единые, взаимосвязанные модели для расчета показателей эффективности для каждого элемента системы.

6. Сформированы математические модели и алгоритмы для формирования ограничений по возможностям проведения съемки, основой которых стали модели формирования стратегии коррекций КА ДЗЗ в части определения интервалов активных участков орбит, компенсирующих их деградацию.

7. Определены требования, предъявляемые к новому специализированному программно-математическому обеспечению и разработана методика создания программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых научно обоснованных теоретических основ для решения важной научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли.

Практическая значимость состоит в создании новых технических решений, внедрение которых имеет существенное значение для совершенствования отечественной космической системы ДЗЗ. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития существующей космической системы ДЗЗ как единой территориально-распределенной информационной системы. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Подтверждена возможность повышения общего уровня планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом.

2. Подтверждена возможность повышения уровня автоматизации распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом.

3. Подтверждена возможность оптимизации распределения процессов обработки результатов съемки по разным пунктам приема информации (ППИ) в составе НКПОР, с учетом их производительности, а также территориального и временного факторов.

4. Предложена методика формирования системы взаимосвязанных математических моделей функционирования космического и наземного сегментов как элементов единой информационной системы.

5. Предложен подход к формированию стратегии коррекций КА ОГ ДЗЗ.

6. Представлена возможность анализа состава и топологии наземных центров с точки зрения определения основных показателей и проведения дальнейших системных исследований.

Основные результаты работы получены и практически использованы в рамках Федеральной космической программы России на 2016 – 2025 годы по теме «Системные исследования и разработка программно-методической базы для моделирования технологических процессов ЕТРИС ДЗЗ», в рабочем процессе АО «ЦНИИмаш», а также в рамках выполнения государственного задания по проекту № 9.7505.2017/БЧ «Разработка методики системного проектирования оптимальных структур орбитальных многоцелевых группировок КА, принципов и методов их построения в целях обеспечения реализации задач наблюдения, навигации и связи»

Методология и методы исследования

В качестве методологической основы используется системный подход. На нем основывается раздельное формирование моделей и алгоритмов функционирования космического и наземного информационных сегментов как составных частей космической системы ДЗЗ, выбора показателей эффективности и ограничений с последующей отработкой в рамках единой базовой подсистемы. – типового унифицированного программного средства, методический и алгоритмический аппарат которого позволяет решать широкий круг задач по распределению потоков целевой информации.

Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы динамики полета, теории управления, методы подготовки данных, методы оптимального управления и обработки информации. При программной реализации математического обеспечения используются методы объектно-ориентированного программирования и мультизадачность операционных систем Windows

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся:

1. Теоретические основы и методика решения проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, как сложной, территориально-распределенной организационно-технической информационной системой, основной задачей которой является реализация полного цикла обслуживания, начиная с формирования заявки и заканчивая предоставлением готового тематического продукта.

2. Архитектура и состав взаимосвязанных математических моделей, составляющие основу процессов обработки и предназначенные для формирования потоков целевой информации в космической системе ДЗЗ.

3. Методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которых автором разработан комплекс программ.

4. Результаты экспериментальной отработки распределения потоков целевой информации в космической системе ДЗЗ в условиях, приближенных к реальным.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием современной теории системного анализа и оптимального управления, использованием апробированного математического аппарата, обоснованием полученных результатов математическими расчетами и проведенным сравнительным анализом полученных результатов экспериментальной отработки с реальными данными.

Апробация работы проведена на научно-технических семинарах кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. Результаты работы докладывались и получили одобрение на научно-технических советах Научного центра оперативного

мониторинга Земли АО «Российские космические системы» в рамках составной части НИР по теме «Системные исследования и разработка программно-методической базы для моделирования технологических процессов ЕТРИС ДЗЗ» (2017, 2018 г.г.), на научно-технических конференциях: 22-й, 23-ей и 24-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (2017, 2018, 2019 г.г.), XLIV Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г.), 15-й и 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (2016, 2017 г.г.), 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS 2017), 4th International Academy of Astronautics SciTech Forum (IAA SciTech Forum 2018), VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов центра управления полетами ЦНИИмаш (2016 г.) Applications of Global Navigation Satellite Systems, www.unoosa.org (2010) и др.

Личный вклад и публикации

Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Эти исследования включают формализацию задачи, техническую и математическую постановку, разработку моделей, применение вычислительных методов, создание программного комплекса, расчеты и анализ результатов. Из совместных работ в диссертацию вошел только тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен ссылками. Основные результаты опубликованы в 30 работах, из которых 12 – в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, соответствующих специальности 05.13.01 (авиационная и ракетно-космическая техника), 5 – опубликованы иностранных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены результаты формализации задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ и сформулирована техническая постановка задачи. С этой целью: проведен анализ состояния и проблем развития систем ДЗЗ; определены основные объекты системы; выявлены основные рабочие процессы; проведен анализ и сформированы показатели эффективности; дана техническая постановка оптимизационной задачи.

Современное состояние космических систем ДЗЗ характеризуется следующими факторами. Во первых происходит существенное наращивание орбитальной группировки и объемов данных ДЗЗ. Так в Российской Федерации в период до 2020 года планируется увеличение ОГ до минимально необходимого состава из 22 аппаратов. В период до 2025 года планируется обеспечение круглосуточного и всепогодного наблюдения территории России, при пространственном разрешении наблюдения в видимом диапазоне от 1 до 0,4 метра, что будет соответствовать современному мировому уровню. За рубежом численность ОГ ДЗЗ растет еще более высокими темпами. Так только в США и

Канаде системы наблюдения в видимом ближнем и ИК-диапазонах со сверхвысоким разрешением достигнет 40+, а с высоким – 400+. В Китае 100+ и 200+ соответственно.

Наметился переход к группировкам (кластерам) космических аппаратов, насчитывающих десятки и даже сотни КА.(проекты PlanetLabs, SkySat (Terra Bella, США, California), Vivid-X2 (Surrey Satellite Technology, Великобритания, съемка видео и высокое разрешение < 1 м), ICEYE (Финляндия, радарная группировка микроаппаратов), UNISAT (GAUSS Srl, Италия) и др.). Как следствие – экспоненциальный рост объемов передаваемой и обрабатываемой информации в системе ДЗЗ в целом

Существенно растет доля коммерческой составляющей в тематических продуктах по различным отраслям применения. В целом, в Российской Федерации наблюдается кратное увеличение доли негосударственных заказчиков (рисунок 1). При этом отмечается проблема

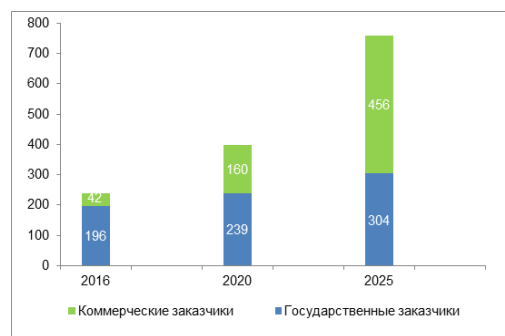


Рисунок 1 – Рост коммерческой составляющей в РФ (млн. долл.)

несвоевременного предоставления готового продукта или отказа в обслуживании. В работе выявлена одна из причин возникновения этой проблемы. С этой целью рассмотрены и проанализированы основные объекты системы, включающие в себя: КА и их целевую аппаратуру, наземную космическую инфраструктуру, производимые системой информационные продукты, потребители и их заявки, циклограммы, снимки и маршруты. КА рассматривались как с точки зрения носителей аппаратуры, так и с точки зрения орбитального построения. Аппаратура КА накладывает ограничения на возможность проведения им съемки для выполнения заявки потребителя. Эволюция орбитального построения приводит к появлению ограничения, связанного с необходимостью проведения коррекций и, как следствие, временное прекращение работы КА по назначению (техническое обслуживание). Время технического обслуживания зависит от типа орбиты КА: низкие, близкие к круговым, с высотой 400~1000 км, высокие наклонные круговые и геостационарные, высокоэллиптические.

Анализ поступающих в систему заявок потребителей с учетом их приоритетности (экстренные, срочные, важные, обычные, фоновые и прочие), периодичности и отказов в их выполнении (рисунок 2)

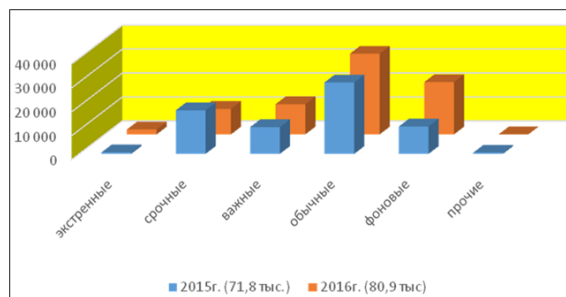


Рисунок 2 – Распределение заявок по приоритетам

позволил сделать следующие системные обобщения:

- при росте спроса распределение заявок по приоритетам меняется незначительно;
- проблемным является выполнение с одинаковым качеством заявок на периодическую съемку;
- доля необслуженных заявок весьма велика и может достигать до 80% в отдельных группах заявок.

Преобладание «обычных» и значительная доля необслуженных заявок свидетельствуют о том, что текущее планирование распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ требует значительного улучшения. Для того, чтобы определить за счет чего может произойти это улучшение в работе рассмотрен алгоритм обработки заявки потребителя, при котором обработка снимка до готового тематического продукта требует выполнения определенной последовательности действий, которые могут быть выполнены на разных ППИ с разной степенью производительности и разными затратами.

Выявлено, что недостатком существующей системы планирования является то, что как правило, обработка снимков до готового тематического продукта проводятся в рамках одного ППИ, без учета текущих возможностей других. При создании и архивации тематического продукта слабо учитываются возможности других территориально-распределенных ППИ, их текущая загруженность и разница во времени. Учет степени текущей загруженности ППИ в системе осуществляется в «ручном» режиме, да и само понятие «степень загруженности» на данный момент носит скорее чисто интуитивный характер. Предполагаемое увеличение числа заявок и ввод новых КА в орбитальную группировку приведет к неравномерной загрузке КА и НКПОР и, как следствие, к отказам в обслуживании.

Другой из проблем является наличие нерешенной задачи Оператора системы, связанной с оптимизацией маршрута передачи обрабатываемого снимка между всеми узлами системы, который обеспечит выполнение нужной последовательности технологических операций. Кроме того, при наращивании ОГ КА ДЗЗ возникнет ситуация с избыточностью источников космической информации. В связи с этим целесообразно рассмотреть вариант объединения информационных потоков космического и наземного сегмента в один общий поток и рассматривать оптимизацию его распределения с точки зрения общесистемных показателей эффективности.

Сложность задачи оптимизации здесь заключается в наличии большого числа показателей, используемых на разных этапах планирования. В работе проведена систематизация этих показателей по группам:

1. Технические показатели эффективности целевого функционирования, отражающие оценки отдельных свойств системы: разрешение обработанных снимков; точность плановой привязки обработанных снимков; суммарный объем

полученной в НКПОР информации; суммарная отснятая площадь (производительность системы) и др.

2. Функциональные показатели эффективности системы, отражающие оценки свойств подсистем: вероятности обслуживания заявок в зависимости от приоритета; вероятности отказа в обслуживании заявок в зависимости от приоритета; оперативность исполнения заявок в зависимости от приоритета; глубина обработки отснятых маршрутов в зависимости от приоритета; суммарная относительная площадь, выданная потребителям, в зависимости от приоритета и др.

3. Показатели эффективности системы в целом, отражающие интегральные оценки свойств системы: суммарное время обслуживания заявок; эффективная производительность системы (суммарная относительная площадь, выданная потребителям); совокупная ценность продуктов обработки отснятых маршрутов; осредненная оперативность исполнения заявок; суммарный объем архивов НКПОР и др.

Все показатели эффективности зависят от баллистической структуры, характеристик целевой аппаратуры и наземного комплекса приема обработки и распределения информации. При этом, оптимизация целевых параметров функционирования представляет собой два основных блока: оптимизация работы бортовой целевой аппаратуры КА и наземного комплекса.

В нашем случае, когда в состав системы входят компоненты космического и наземного сегмента предложено использовать метод объективного свертывания и перейти к частным показателям, характеризующим эффективность целевого функционирования, которыми являются *оперативность* (время) выполнения заявок на получение готового тематического продукта и *стоимость* готового тематического продукта (рисунок 3).

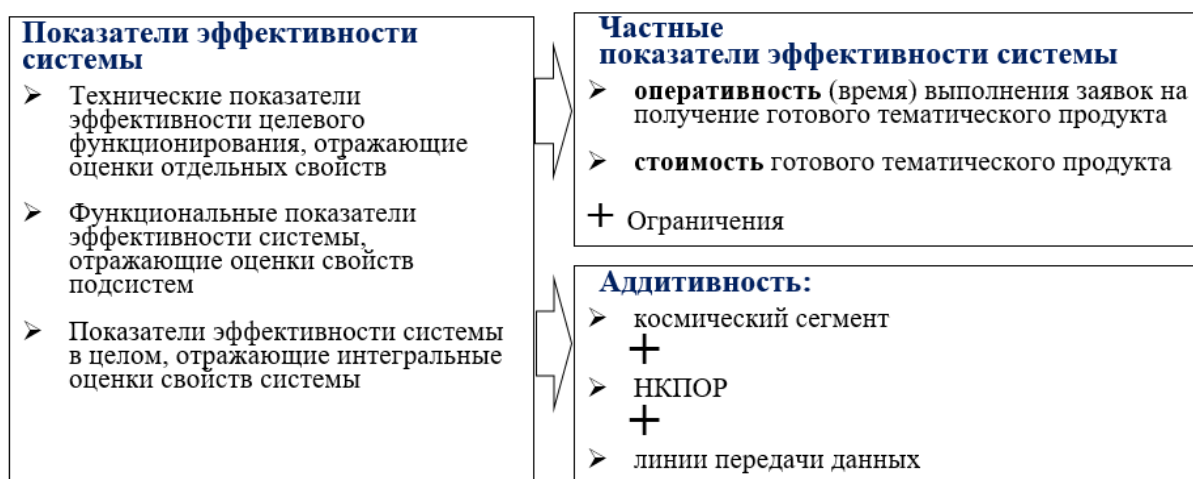


Рисунок 3 – Объективное свертывание показателей эффективности

Оперативность выполнения заявок зависит от оперативности приема-передачи информации с борта КА на ППИ и времени, необходимого для проведения съемки. Данный показатель напрямую зависит от параметров заявки потребителя (географического положения, наблюдаемой площади, спектральных диапазонов,

требований к тематическому продукту), географического расположения ППИ, их возможностей по получению готового тематического продукта, баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ и поэтому может использоваться как комплексный (интегральный) показатель эффективности космической системы ДЗЗ как информационной системы.

Стоимость готового тематического продукта также характеризует эффективность целевого функционирования. Если рассматривать систему в целом, то, конечно, в качестве показателя необходимо выбирать доход или прибыль. Но формализовать модель расчета такого рода показателей не представляется возможным, поэтому стоимость готового продукта, как определяющая часть при расчете дохода или прибыли, и выбрана в качестве показателя эффективности. Он может быть рассчитан на основе моделирования процесса обработки информации с момента подачи заявки до момента передачи требуемого тематического продукта потребителю и, таким образом, характеризуют эффективность целевого функционирования системы с учетом параметров бортовой целевой аппаратуры КА, баллистического построения орбитальной группировки, факторов внешней среды, режимов съемки, передачи и дальнейшей наземной обработки информации. Таким образом, этот показатель также является комплексным (интегральным).

Как видно из характеристик упомянутых выше показателей, каждый из них зависит от орбитального построения КСН и параметров бортовой целевой аппаратуры КА, характеристик НКПОР и в целом характеризует степень достижения целей космической системы ДЗЗ – получение потребителем информации с заданными требованиями по спектральному разрешению, периодичности наблюдений и оперативности передачи информации.

При этом, оперативность (время) выполнения и стоимость обслуживания единичной j -й заявки на получение q -го тематического продукта включают в себя соответствующие показатели для космического сегмента (КА), наземной космической инфраструктуры (НКИ) и линий связи (ЛС), и равны:

$$T_{\text{обсл } j q} = T_{j q \text{ КА}} + T_{j q \text{ нки}} + T_{j q \text{ лс}} \quad C_{j q} = C_{j q \text{ КА}} + C_{j q \text{ нки}} + C_{j q \text{ лс}} \quad (1)$$

Решение задачи оптимизации выбранных показателей эффективности требует наличие вектора независимых переменных. Независимая переменная должна быть относительно самостоятельным фактором, который оказывает свойственное именно ему воздействие на систему. Для космической системы ДЗЗ, рассматривая ее как информационную систему, в качестве таких независимых переменных в работе предложено использовать *системное время* и *объем* (или условный объем, или трафик) перемещаемой в системе информации. Действительно, зная время и объем информации можно прямо или косвенно рассчитать как время, так и стоимость необходимые для обработки заявки при выбранном маршруте ее прохождения по узлам системы.

В качестве общих ограничений в каждом узле системы выступают:

- ограничение на максимальное количество одновременно выполняемых процессов: $N_{\text{проц}} \leq N_{\text{проц max}}$;
- ограничение на максимальный объем информации: $V_{\text{вх}} + V_{\text{вых}} < V_{\text{своб}}$.

Таким образом, в результате объективного свертывания показателей эффективности и выборе времени и объема перемещаемой информации в качестве независимых переменных удалось (рисунок 3):

- уменьшить размерность вектора показателей эффективности до двух, что позволило в дальнейшем использовать эффективные методы многокритериальной оптимизации;
- выявить аддитивность показателей эффективности, что в дальнейшем существенно упростило математическое описание и расчет их составных частей.

С системной точки зрения, независимо от того, на каком этапе решается задача распределения целевой информации с разнотипных КА по составным частям системы она сводится к оптимизации информационного маршрута, включающего:

- выбор нужного кластера КА, который обеспечит съемку с требуемым качеством;
- выбор наземных ППИ для передачи отснятых данных с КА-исполнителя(ей);
- выбор наземных ППИ для проведения полного цикла обработки данных;
- выбор ППИ для передачи тематического продукта потребителю.

Формально, распределение целевой информации по составным частям космической системы ДЗЗ можно представить в виде (рисунок 4):

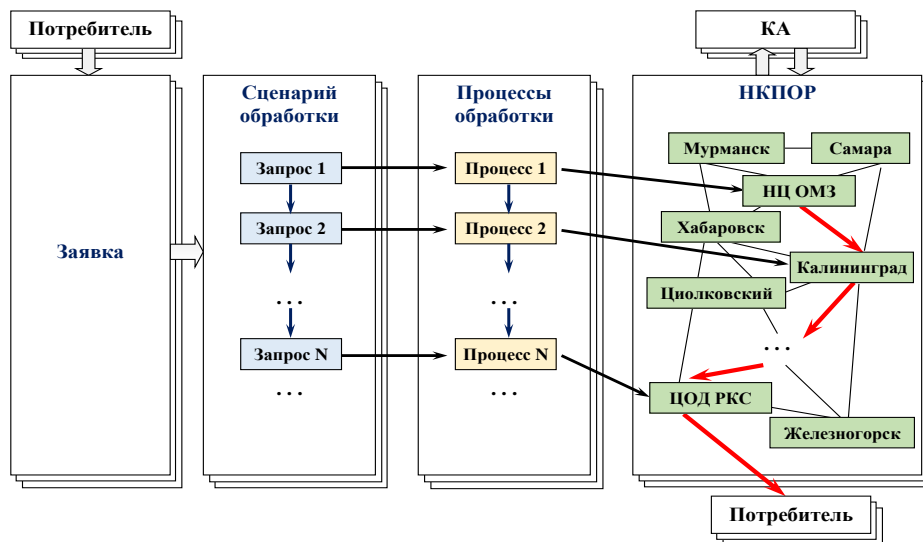


Рисунок 4 – Последовательность решения задачи

На входе имеется следующая информация:

1) информация о совокупности всех космических аппаратов и ППИ, которые определяют узлы нашей информационной системы, о которых нам известно: в части ОГ КА ДЗЗ – перечень и технические характеристики всех КА; в части НКИ – перечень и характеристики (возможность хранения данных, степень обработки

информации, подлежащей хранению, объем хранилища, тип выходной продукции, скорость передачи информации потребителям) пунктов приема информации (ППИ);

3) политика распределения вычислительных ресурсов (совокупность запретов и приоритетов на получение, обработку, хранение и выдачу информации потребителям);

4) перечень потребителей (географическое расположение, приоритет, заявки);

5) количество и пропускная способность каналов передачи информации между узлами, перечень абонентов каждого канала;

б) время выполнения и условная стоимость каждой операции.

Потребители формируют заявки к системе, каждый со своими требованиями и частотой. Заявка, поступившая от потребителя требует реакции информационной системы, которая заключается к формированию последовательности запросов на выполнение операций. Последовательность запросов определяются сценарием обработки. Каждому запросу из сценария может быть поставлен в соответствие один из типовых процессов. Каждый из процессов может быть выполнен только в заранее определенных узлах системы.

Таким образом, в работе сформулирована *техническая постановка задачи*, которая заключается в следующем.

Дано:

- информация о совокупности всех космических аппаратов и ППИ, которые определяют узлы нашей информационной системы;
- политика распределения вычислительных ресурсов (совокупность запретов и приоритетов на получение, обработку, хранение и выдачу информации потребителям);
- перечень потребителей (географическое расположение, приоритет, заявки);
- количество и пропускная способность каналов передачи информации между узлами, перечень абонентов каждого канала;
- математические модели для расчета времени выполнения и условной стоимости каждой операции.

Необходимо определить: распределение процессов обработки заявки пользователей по элементам инфраструктуры системы ДЗЗ (маршрут прохождения заявки) с целью повышения эффективности работы системы в целом с учетом выбранных показателей.

Выходом является технологическая карта, которая представляет собой совокупность:

- распределения процессов обработки информации ДЗЗ по узлам системы и архивам объектов НКИ;
- времени обеспечения потребителей заказанной информацией (с момента приема данных средствами НКИ или запроса архивных данных);
- оценки стоимости обработки информации;
- загруженности узлов и заполняемость их хранилищ информации.

Во второй главе предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи управления, который включает в себя: формулировку математической постановки оптимизационной задачи, выбор общего подхода к ее решению и определение условий применимости. Определен перечень и даны характеристики моделей, необходимых для математической постановки задачи, включающие в себя: единую модель процесса обработки информации космическим сегментом и наземным сегментом и модель передачи данных. Сформулирована математическая постановка оптимизационной задачи и перечень моделей для дальнейшей разработки.

В рамках данной работы математическая постановка задачи сформулирована при условии выполнения определенных ограничений, а именно:

- сценарий обработки заявки выполняется последовательно, недопустим возврат или откат на предыдущие этапы;
- отдельно взятый процесс не может быть распараллелен;
- параметры заявки не изменяются на всем интервале планирования;
- выполнение сценария по заявке не может быть прервано, результаты доступны потребителю только после окончания обработки и формирования технологической карты;
- информационная система функционирует идеально, без искажения информации и возможных технических неполадках;
- при невозможности немедленно отправить заявку на обслуживание по причине полной загруженности необходимых КА или ППИ она ставится в очередь;
- при обнаружении в процессе обработки заявки того факта, что в последующем узле ресурсов для ее обработки недостаточно, то после завершения процесса обработки она остается в режиме ожидания до освобождения соответствующих ресурсов.

Представление решения задачи как последовательности выполнения процессов обработки возможна при наличии взаимосвязанных математических моделей:

- единой модели процесса обработки информации космическим сегментом;
- единой модели обработки информации наземным сегментом (НКПОР);
- модели передачи данных.

Каждая из этих моделей должна на входе иметь некий объем информации, преобразовывать его (уменьшать или увеличивать) вычислять системные показатели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

Для того чтобы методы и алгоритмы имели одинаковые схемы реализации, а модели процессов целевого функционирования имели общность в способах формирования и представления информации необходимо все расчеты осуществлять

на одинаковом множестве независимых параметров при наличии общесистемных ограничений.

Единая модель процесса обработки информации элементом космического сегмента (КС) может быть представлена в виде функции генерации трафика, входом которой являются параметры заявки, такие как география района съемки и его площадь, требования к качеству снимков и типам съемочной аппаратуры, а также приоритетность выполнения заявки (рисунок 5).

Входные данные определяются потребителем и включают в себя: географические данные по району(нам) наблюдения; тип используемой аппаратуры наблюдения; приоритет заявки (обычная или важная).

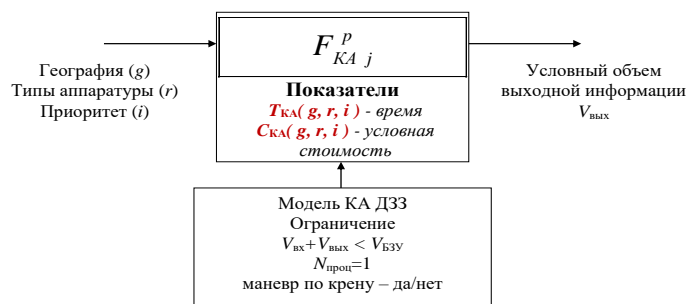


Рисунок 5 – Модель процесса обработки информации (космический сегмент)

Ограничения: при расчете частных показателей эффективности являются: максимальное количество одновременно выполняемых процессов – 1; ограничение на максимальный объем информации, связанное с возможностями БЗУ; возможность выполнения маневра по крену для увеличения полосы обзора.

Допущения: возможно одновременное включение аппаратуры разного типа; во время включения возможно проведение наблюдений в интересах других заявок, если это не связано с переориентацией линии визирования; после передачи информации на наземный сегмент происходит ее удаление из БЗУ.

Выходом является созданный объем первичной информации, получаемой с КА. Для расчета оперативности обработки и стоимости района наблюдения, представленного в заявке, для каждого КА необходимо уметь вычислять:

- множество возможных моментов времени начала и продолжительность съемки;
- множество возможных моментов времени начала и продолжительность сеансов связи.

Укрупненно, единую модель процесса обработки информации в узле НКПОР можно представить как взаимосвязанную последовательность функций $F_{ППИ i}^P$ изменения условного объема информации при применении к ней соответствующего процесса обработки (функцию изменения трафика, см. рисунок 6). Функция зависит от объема входной информации и производительности наземного ППИ. В простейшем случае производительность может быть задана в виде повышающего или понижающего коэффициентов.

Ограничениями при расчете частных показателей эффективности здесь являются: максимальное количество одновременно выполняемых процессов; ограничение на максимальный объем информации.

$ППИ \rightarrow Процесс_1 \rightarrow \dots \rightarrow Процесс_N \rightarrow Потребитель$
 где $Процесс_i$ представляет собой:

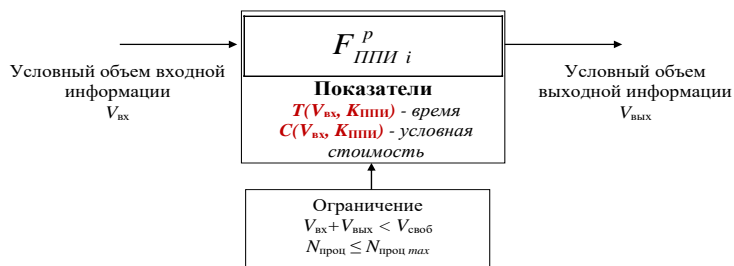


Рисунок 6 – Модель процесса обработки информации (наземный сегмент)

Таким образом, если имеется сформированная заявка, для выполнения которой выбран соответствующий кластер КА и математически описаны все процессы ее обработки, то все возможные варианты расчета показателей эффективности выполнения заявки образуют направленный граф (рисунок 7).

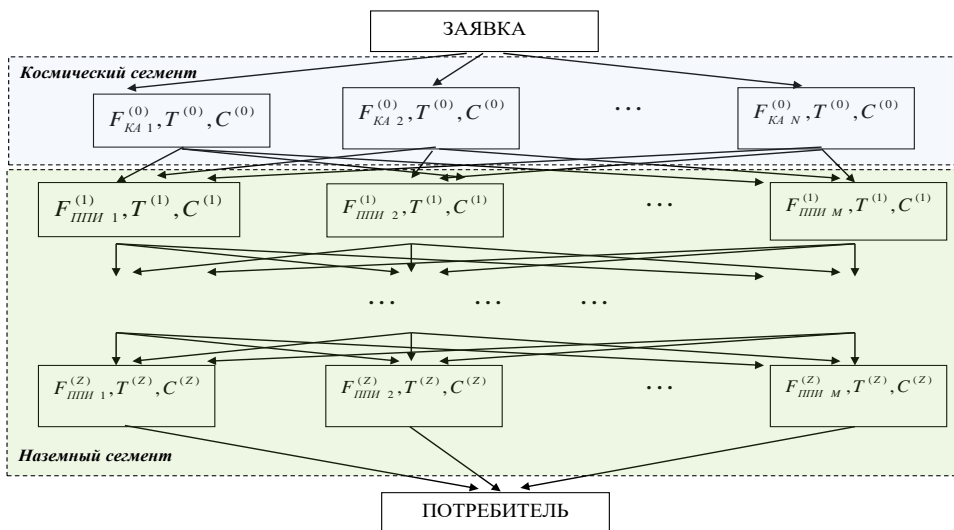


Рисунок 7 – Граф возможных вариантов выполнения заявки

Вершиной графа является заявка. Формализованные данные заявки передаются на элементы космического сегмента для расчета возможных вариантов проведения съемки и передачи информации на ППИ. Далее представлены процессы обработки в НКПОР, каждый уровень соответствует процессу, который может быть выполнен на том или ином ППИ. На нижнем уровне находится потребитель. Предполагается, что он для конкретной заявки единственный и все заключительные процессы обработки завязаны на нем. Характеристики каналов связи между узлами считаются известными, по ним мы можем определить время и стоимость передачи информации. Прохождение трафика по графу приведет к вычислению системных показателей.

Таким образом, математическая постановка задачи заключается в оптимизации маршрута прохождения заявки по узлам графа

$$\Gamma = \{\Gamma_k, k = \overline{1, K}\} = \{(Q, L)_k, k = \overline{1, K}\}, \quad k_i = const, i = \overline{1, N} \quad (2)$$

с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей, или их свертки, при наличии текущих ограничений (рисунок 7).

Представленная математическая постановка определила необходимость в разработке согласованных между собой математических моделей более низкого уровня, декомпозиция которых изображена на рисунке 8.

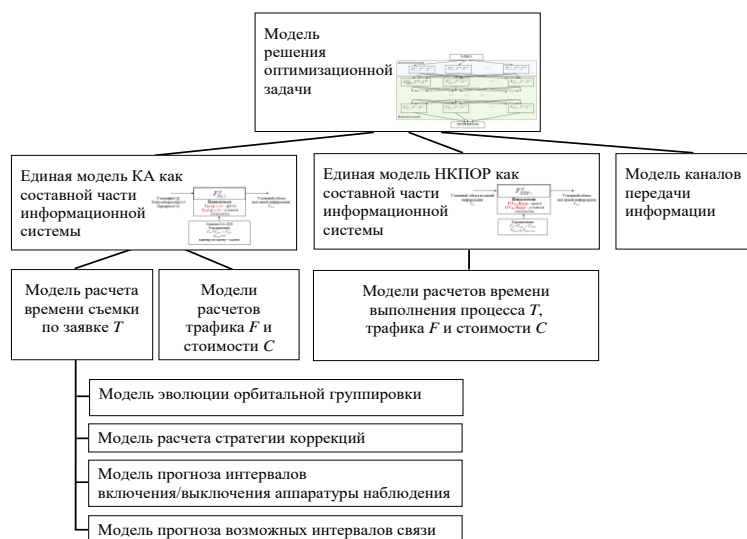


Рисунок 8 – Система взаимосвязанных моделей

В третьей главе содержится описание взаимосвязанных математических моделей орбитальной группировки как составных частей информационной системы, основной задачей которой является съемка наземных объектов и формирования начального объема информации для ее дальнейшей обработки. К ним относятся (рисунок 8): модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния КА, а также проведения орбитальных коррекций; модели описания земных объектов модель проведения съемки, включая модели целевой аппаратуры; модели проведения сеансов связи и передачи целевой информации между КА и ППИ.

Результатом применения модели являются:

- множество интервалов времени вывода КА на техобслуживание, связанное с необходимостью проведения коррекций орбиты;
- последовательность возможных интервалов времени проведения наблюдений заданного района $\{(t_{ik}^1, t_{ik}^2)\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$;
- последовательность возможных интервалов времени проведения сеансов связи КА \leftrightarrow ППИ $\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$.

В качестве модели движения для определения интервалов времени принята система дифференциальных уравнений для описания пространственного движения космического аппарата в оскулирующих элементах:

$$\begin{aligned}
\frac{dp}{dt} &= 2r \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y; & \frac{de}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ \sin \vartheta \sum g_x + \left[\cos \vartheta + \frac{r}{p} (\cos \vartheta + e) \right] \sum g_y \right\} \\
\frac{d\Omega}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\sin i} \sum g_z; & \frac{di}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u \sum g_z \\
\frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} + \frac{\cos \vartheta}{e} \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_x - \frac{\sin \vartheta}{e} \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y; & \frac{du}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} - \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\tan i} \sum g_z
\end{aligned} \tag{3}$$

с учетом влияния нецентральности гравитационного поля Земли, возмущений гравитационной природы от Луны и Солнца, давления солнечного света, торможения атмосферой и работы корректирующей двигательной установки.

Основными возмущениями типовых орбит КА ОГ ДЗЗ являются: долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла. В работе представлены математические модели расчета коррекции соответствующих параметров в импульсной постановке.

Отдельно рассмотрен случай, когда фазовая траектория, описывающая эволюцию корректируемого параметра может быть записана в виде:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k [(1 + \mu_k) u_k] + D_k + \xi_k \tag{4}$$

где k – число шагов; x_k – n -мерный вектор состояния системы; u_k – m -мерный вектор управления; A_k – квадратная матрица размером $n \times n$; B_k – прямоугольная матрица размером $n \times m$; D_k – неслучайный вектор размером n ; μ_k – мультипликативная ошибка управления; ξ_k – вектор ошибок прогноза вектора состояния x_{k+1} ;

Это соответствует ситуации, описывающей снижение высоты КА на низких круговых орбитах за счет торможения атмосферой или изменения географической долготы восходящего узла высокой круговой или высокоэллиптической орбит. Автором предложен алгоритм расчета коррекции на основе использования достаточных условий оптимальности. Согласно этому алгоритму оптимальное с точки зрения квадратичного критерия $J = \min_{\{u_k\}} M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}]$. управление представляет линейную функцию:

$$u_k = -L_k x_k - d_k \tag{5}$$

где коэффициенты обратной связи L_k и смещение d_k вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned}
L_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1} A_k, & d_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T (\lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}), \\
\gamma_k &= (1 + \sigma_k^2) B_k^T \lambda_{k+1} B_k, & \lambda_k &= A_k^T \lambda_{k+1} A_k - L_k^T \gamma_k L_k, \\
G_k &= A_k^T \lambda_{k+1} D_k + A_k^T G_{k+1} - \gamma_k d_k L_k^T, \\
c_k &= c_{k+1} + sp[F_k^T \lambda_{k+1} F_k K_k] + D_k^T \lambda_{k+1} D_k - \gamma_k d_k^2 + 2G_{k+1}^T D_k \\
\lambda_{N+1} &= \lambda; & G_{N+1} &= 0; & c_{N+1} &= 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

При этом показано, что существует возможность заранее определить состояние КА в установившемся режиме:

$$x^* = (E - \tilde{A})^{-1} \tilde{C} \quad (7)$$

и, тем самым, заранее рассчитать возможные интервалы времени проведения коррекций.

Для определения последовательности возможных интервалов времени проведения наблюдений отдельным КА заданного района использовалась модель прогноза (3) с учетом запретов на проведение съемки, связанными с техобслуживанием КА. С этой целью сформированы: модели объектов съемки (рисунок 9), модель проверки возможности наблюдения (рисунок 10) и модель проверки условий освещенности.

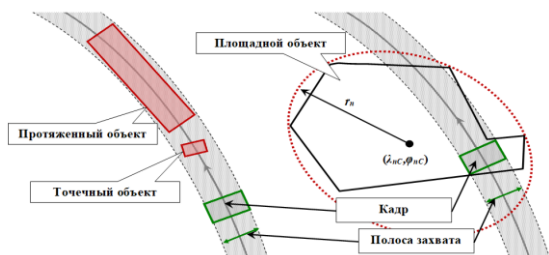


Рисунок 9 – Типы объектов съемки

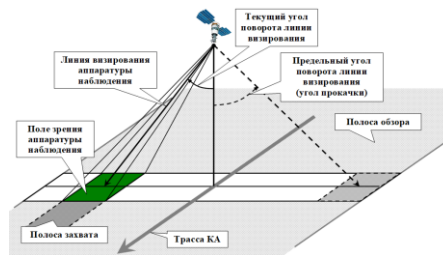


Рисунок 10 – Иллюстрация проверки возможности наблюдения

При этом, учитывались возможности многопроходной съемки, выполняемой в надир, многопроходной съемки, выполняемой с переориентацией оси визирования камеры, съемки в азимутальном режиме, реализуемом счет синхронизированного программного разворота по тангажу и крену, одновитковой двухполосной съемки со скачкообразной переориентацией оси визирования камеры по тангажу и крену после первого прохода. В модели переориентации участкам изменения углов визирования земных объектов бортовой съемочной аппаратурой КА соответствуют участки кусочно-постоянной функции скорости ее переориентации, а сам процесс переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА характеризуется предельным углом визирования земного объекта и предельной скоростью.

Для формирования последовательности возможных интервалов времени проведения сеансов связи между отдельным КА и ППИ также использовалась модель прогноза (3), с помощью которой определялась взаимная видимость КА↔ППИ (рисунок 11)

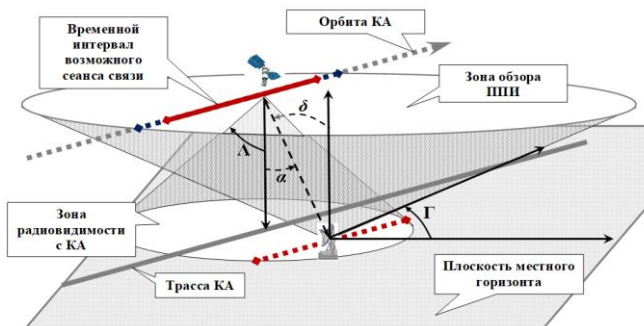


Рисунок 11 – Иллюстрация возможности проведения сеанса связи КА↔ППИ

Для расчета ограничений на объем данных отдельно взятого КА принята модель динамики бортового запоминающего устройства, в которой занятый объем

БЗУ увеличивается/уменьшается линейно по времени, скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры, а приращение занятого объема БЗУ за счет съемки одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

В четвертой главе предложена обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы ДЗЗ как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика).

Формально каждый элемент рассматриваемой системы представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности: времени, необходимого для выполнения процесса; условной стоимости обработки. И проверке ограничений: на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов; на максимальный общий объем памяти.

В рамках такой формализации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий связи предложены: модель расчета объема выходной информации; модель расчета времени выполнения процесса; модель расчета стоимости.

Для оценки объема сбрасываемой с отдельного КА на ППИ информации (начального трафика) считалось, что для каждого типа аппаратуры наблюдения имеется прямая связь между общей площадью района съемки, заданного в заявке, и объемом информации, передаваемым с каждого конкретного КА на ППИ. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично. Время выполнения процесса определяется как время, необходимое для передачи циклограммы работы на борт КА, для проведения съемки и передачи снимка на ППИ. Ограничениям являются объем БЗУ. Все эти параметры вычисляются с использованием математического аппарата, представленного в третьей главе.

Для оценки затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса считалось, что стоимость обслуживания одного КА в единицу времени $C_{уд}$ зависит от сложности КА – $Q_{КА}$ и затрат на оплату труда операторов смены. Тогда для оценки стоимости обслуживания заявки $C_{iqКА}$ одним КА можно рассчитать по формуле:

$$C_{jq\text{КА}} = (C_{уд}(Q_{ка}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot (t_{пд2} - t_0), \quad (8)$$

где $C_{оп}$ – стоимость человека/час в конкретном ППИ, $N_{оп}$ – число операторов в смене. Параметр $C_{уд}(Q_{ка})$, входящий в эмпирическую формулу существенно зависит от уровня развития техники и нуждается в периодическом уточнении на основании обработки статистических данных по различным КА. Также возможно более упрощенное, табличное представление уравнения (8).

Для оценки изменения объема информации при применении к ней процесса обработки считалось, имеется прямая связь между объемом входной и выходной информации. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично.

Общее время выполнения процесса рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{проц } i} = K_{\text{ппи}} \cdot T_{\text{эталон.проц } i}(V_{\text{вх}}) + T_{\text{ожидания}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{ожидания}}$ – время ожидания до момента освобождения ресурсов в следующем узле, когда для каждого момента времени выполнения процесса выполняются условия: количество одновременно запущенных однотипных процессов на каждом наземном пункте строго меньше заданного $V_{\text{вх}} + V_{\text{вых}} < V_{\text{своб}}$; объем входной и выходной информации не превышает уровня объема свободной памяти $N_{\text{проц}} \leq N_{\text{проц max}}$.

$T_{\text{эталон.проц } i}$ – эталонное время выполнения процесса в эталонном наземном пункте, зависящее от объема входной информации;

$K_{\text{ппи}}$ – коэффициент производительности наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных. Возможно также более упрощенное представление расчета времени в виде таблицы.

Для оценки затрат на обслуживание процесса при обработке единичной заявки со стороны наземного пункта считалось, что стоимость обслуживания процесса в единицу времени $C_{\text{проц.уд}}$ зависит от его сложности – $Q_{\text{проц}}$ и затрат на оплату труда задействованных операторов. Тогда для стоимости обслуживания заявки $C_{iq\text{проц}}$ одним ППИ будем иметь:

$$C_{jq\text{проц}} = (C_{\text{проц.уд}}(Q_{\text{проц}}) + C_{\text{оп}} \cdot N_{\text{оп}}) \cdot C_{\text{ппи}} \cdot T_{\text{эталон.проц } i}, \quad (10)$$

где $C_{\text{оп}}$ – стоимость человека/час в конкретном наземном пункте, $N_{\text{оп}}$ – число операторов, задействованных в процессе обработки.

$C_{\text{ппи}}$ – коэффициент себестоимости наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных. Возможно более упрощенное представление расчета стоимости в виде таблицы.

Предложены способы программной реализации перечисленных моделей. При этом учитывалась необходимость обеспечения возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели. В качестве механизмов, которых обеспечат такую возможность предложено формировать их одним из нижеперечисленных способов:

1. Текстовой формулой в синтаксисе языка программирования, например

$$V_{\text{вых}} = \text{sqrt}(V_{\text{вход}})$$

В этом случае в параметры правой части формулы помимо $V_{\text{вход}}$ могут входить как длительность процесса, так и общие константы.

2. В виде полинома, например $V_{\text{вых}} = aV_{\text{вход}}^2 + bV_{\text{вход}} + c$, где коэффициенты a , b , c задаются экспертами

3. Таблично

4. Внешней вычислительной библиотеки, если расчет показателей связан с привлечением сложной вычислительной процедуры.

В пятой главе предложена методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которой разработан программно-моделирующий комплекс (ПМК), который позволяет решать следующие задачи:

- оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей, используя как скалярный (стоимость или время), так и векторный критерий (стоимость + время).
- автоматизировать формирование плана распределения обработки заявок потребителей по узлам (технологическую карту);
- проводить оценку текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы в будущем.

На основе проведенной декомпозиции задачи предложено в состав ПМК ввести три модуля (рисунок 12).

Модуль «Баллистика» для проектно-баллистического анализа стабильности орбитального построения группировки спутников и определения стратегии коррекций;

Модуль «Анализ» для анализа космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ в части формирования объектов съемки, определения временной последовательности возможных интервалов съемки объектов и возможных интервалов связи с ППИ, доступными по условиям радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена;

Модуль «Планировщик» для решения задачи оптимизации распределения процессов обработки информации по заявкам потребителей при функционировании космической системы ДЗЗ, имеющей в своем составе разнотипные КА и наземные ППИ и формирования технологической карты обработки заявки в виде временной последовательности, включающей в себя:

- интервалы съемки объектов, выделенных по типу целевой аппаратуры, принадлежащих зонам обзора КА;
- интервалы связи с ППИ, доступными по условиям взаимной радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена;
- распределение процессов тематической обработки спутниковой информации на элементах наземной инфраструктуры.

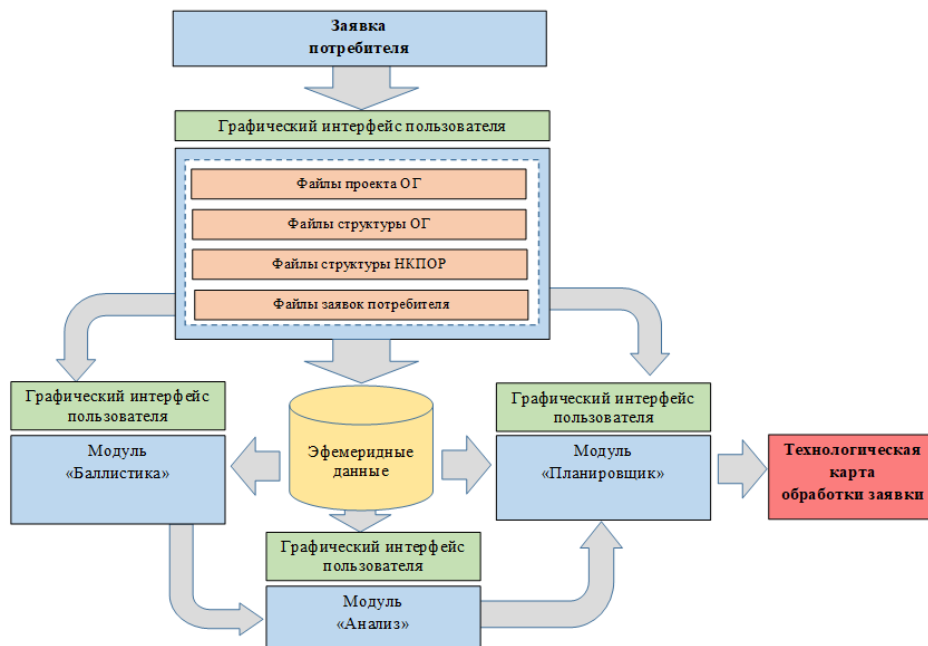


Рисунок 12 – Архитектура ПМК

Главной особенностью предложенной в работе методики и технического облика программно-моделирующего комплекса является:

- возможность внешнего описания вида и параметров математических моделей расчета показателей эффективности, функции преобразования трафика и ограничений;
- возможность независимого использования модулей друг от друга;
- возможность использования модулей в пакетном режиме, что обеспечивает открытость архитектуры ПМК и позволяет внедрять их в программы других разработчиков.

В шестой главе представлены результаты экспериментальной отработки, основной целью которой являлось подтверждение корректности и адекватности разработанных в работе методик, математических моделей и алгоритмов при решения задачи распределения потоков целевой информации в условиях, приближенных к реальным, определения возможностей по настройке состава и характеристик для реальной моделируемой системы, а также подтверждения возможности использования его как инструмента по проведению дополнительных системных исследований для обоснования направлений дальнейшей модернизации космической системы ДЗЗ в части реализации механизмов распределения потоков целевой информации.

В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов ЕТРИС ДЗЗ.

Экспериментальная отработка состояла из:

1. Отработки задачи распределения потоков целевой информации, в качестве исходных данных для которой использованы реальные циклограммы приема данных

ДЗЗ. Для определения характеристик сценариев обработки были рассчитаны коэффициенты стоимости обработки информации ДЗЗ на каждом наземном пункте из сети. Стоимость обработки космическим сегментом не учитывалась. Результаты распределения потоков информации сравнивались с аналогичными решениями Оператора системы. Для экспериментальной отработки были выбраны два самых модернизированных и значительно удаленных друг от друга пункта (далее ППИ-1 и ППИ-2), с которыми и проходило сравнение.

2. Отработки возможности формирования ограничений на проведение съемки, связанное с необходимостью проведения коррекций. С этой целью были отработаны расчеты стратегии коррекций для низких круговых, круговых, эллиптических и высокоэллиптических орбит.

Для экспериментальной отработки задачи распределения потоков целевой информации сформирован типовой сценарий, включающий в себя следующие процессы: прием информации; первичную обработку; каталогизацию; стандартную обработку. Рассчитаны коэффициенты стоимости обработки информации ДЗЗ на каждом наземном пункте. Стоимость обработки космическим сегментом не учитывалась.

На основе суточных данных по обработке заявок потребителей определены форма и параметры математических моделей для расчетов трафика в системе, времени выполнения процессов и ограничений. Для расчета стоимости обработки использовалась экспертная информация о средней заработной плате операторов наземных пунктов и их производительности. Экспериментальная отработка проходила в несколько этапов.

На первом этапе проверялась корректность работы ПМК при формировании исходных данных по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР, сценариев и процессов обработки информации, а также политики распределения ресурсов.

Так как на выбранную дату вся обработка шла в ППИ-1, то он был выбран в качестве объекта исследований. Программе было предложено распределить заявки для обработки. Результаты подтвердили реальную картину: оператор на первичной обработке так же наиболее загружен в утренние и вечерние часы, но только после того, как закончился прием. После первичной обработки каждый маршрут ушел на каталогизацию, утренний поток информации полностью закаталогизирован к половине третьего, ночной – к половине первого ночи.

На втором этапе экспериментальной отработки была проведена проверка первичной обработки на двух значительно географически удаленных друг от друга ППИ, в которых есть полный цикл обработки информации. Отличие заключается в том, что в ППИ-2 работает гораздо меньше людей по сравнению с ППИ-1, и их производительность работы меньше по сравнению с ППИ-1. При распределении потоков рассматривались варианты оптимизации по Парето, оперативности и стоимости.

Здесь можно отметить не только адекватное поставленным условиям поведение математической модели, но и появление нового решения, отличного от выбранного в тот момент Оператором системы, которое привело к улучшению показателей: то, что было принято в ППИ-2, осталось там же и на дальнейшую обработку, плюс добавилась часть маршрутов, принятых в ППИ-2, поскольку в нем наблюдалась большая загруженность, в то время как после утреннего приема ППИ-2 больше информации не принимал (рисунок 13).

При выборе в качестве показателя оперативности выполнения заявки эффект повторился (рисунок 14). Было предложено лучшее, чем использовалось при реальной обработке, распределение процессов, а именно: для минимизации времени нужно гораздо большее число маршрутов обрабатывать в ППИ-2, потому что ППИ-1 был сильно загружен. Утренняя первичная обработка в ППИ-2 пришла в ППИ-1, загруженный вечер в ППИ-1 ушел на ППИ-1.

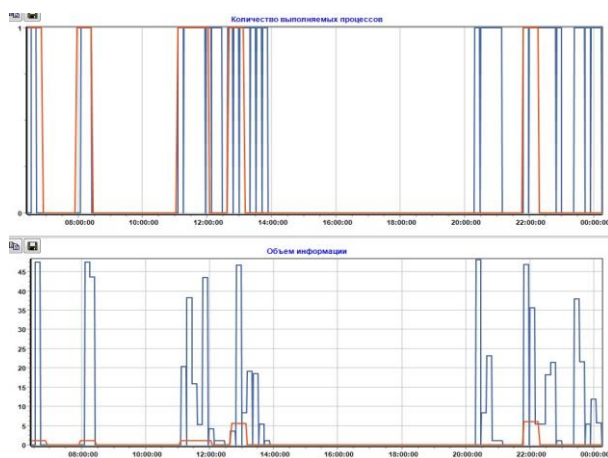


Рисунок 13 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (оптимизация по Парето)

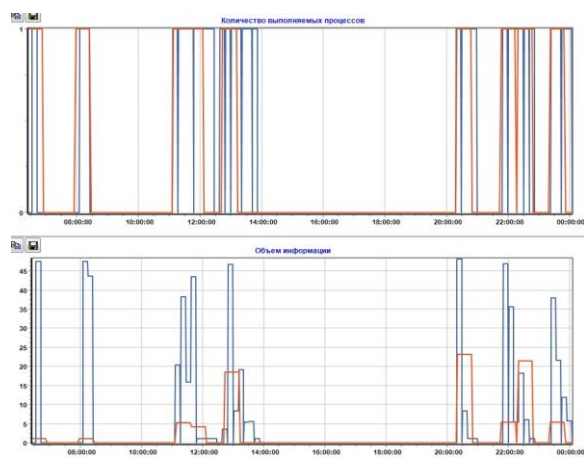


Рисунок 14 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (оптимизация по времени)

При добавлении к первичной обработке процесса каталогизации также удалось добиться улучшения показателей за счет перераспределения маршрутов. В частности, для повышения оперативности обработки необходимо гораздо большее число маршрутов обрабатывать в ППИ-2, потому что ППИ-1 сильно загружен. Утренняя первичная обработка в ППИ-2 пришла в ППИ-1, загруженный вечер в ППИ-1 ушел на ППИ-2.

Следующим этапом отработки являлась проверка возможностей ПМК для проведения системных исследований, в частности было проведено исследование заявок по стандартной обработке. Здесь тоже удалось достигнуть улучшения по сравнению с действиями Оператора (рисунок 15).

Вместо распределения стандартной обработки по двум ППИ предложено использовать только ППИ-1, поскольку передача информации для стандартной обработки в ППИ-2 оказалась нецелесообразной в силу низкой производительности данного узла и необходимости задействования канала передачи данных.

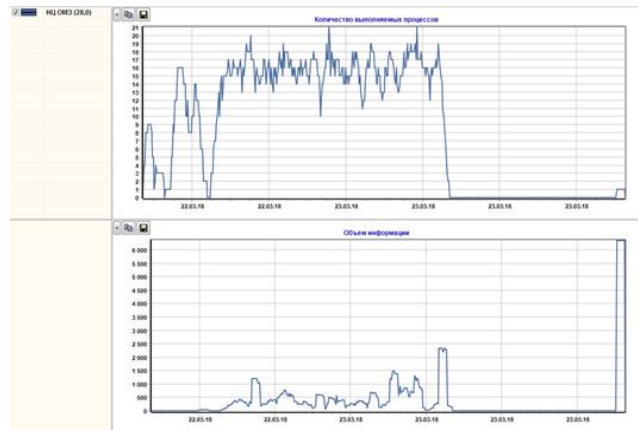


Рисунок 15 – Распределение стандартной обработки (оптимизация по Парето)

Аналогичные результаты получаются и при использовании в качестве критерия времени обработки заявки. Снова ни один из маршрутов не был отправлен в ППИ-2. Это произошло из-за малой производительности стандартной обработки на этом ППИ.

Кроме того, при небольшом завышении числа заявок на обработку, результаты выявили эффект «бутылочного горлышка» (рисунок 16), когда, при увеличении количества заявок, образуется очередь на выгрузку данных из архива, после которой заявки обрабатываются уже только в ППИ-1 без передачи в другие ППИ.

При существующем количестве операторов ППИ-1 стандартной обработки на данный момент это не критично, но при увеличении количества заявок приведет к тому, что будет трудно сохранить штатную работоспособность системы (рисунок 17).

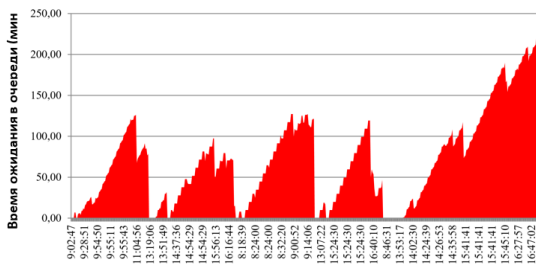


Рисунок 16 – Очередь на загрузку маршрутов из долговременного архива (три дня)

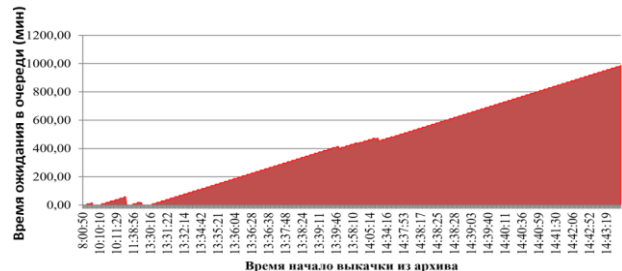


Рисунок 17 – Очередь на загрузку маршрутов из долговременного архива при увеличении числа заявок

Для отработки возможности формирования ограничений на проведение съемки, связанное с необходимостью проведения коррекций были проведены расчеты периодичности проведения коррекций и затрат характеристической скорости для выбранных типов орбит.

На рисунках 18–20 и в таблице 1 представлены характеристики орбит и результаты отработки изменения периода обращения и ГДВУ для ОГ на круговых орбитах с высотой 35879 км, эксцентриситетом 0.0001 и наклоном 64.8°.

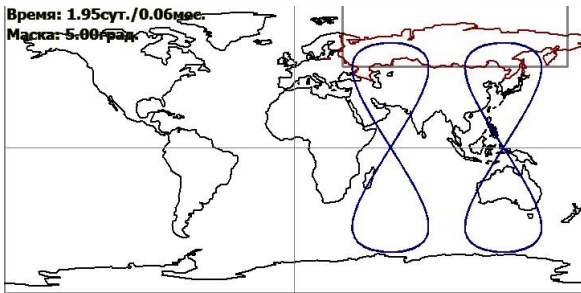


Рисунок 18 – Двухтрассовая группировка в трех орбитальных плоскостях по два КА

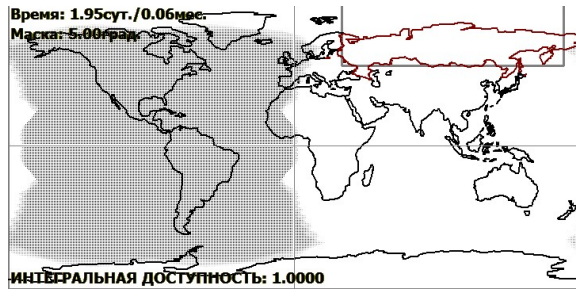
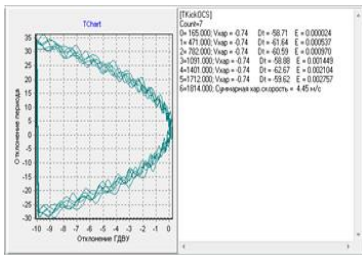
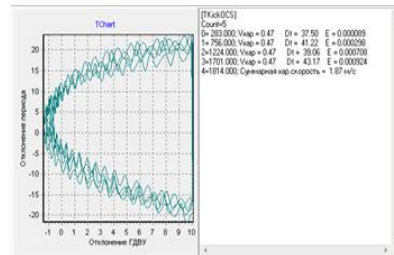


Рисунок 19 – Возможность непрерывного наблюдения



SAT-1 ($\Omega = 120, u = 0$)



SAT-2 ($\Omega = 120, u = 300$)

Рисунок 20 – Предельные циклы удержания ГДВУ

Таблица 1 – Результаты расчетов стратегии коррекции

ОГ	Число коррекций	Период, сут	Хар. скор. м/с
Круговая, $i = 64.8^{\circ}$	9 ÷ 15	232 ÷ 570	4.3 ÷ 9.2

На рисунках 21–22 и в таблице 2 представлены характеристики орбит и результаты обработки стратегии коррекции для ОГ на эллиптических орбитах с высотой перигея 30000 км, эксцентриситетом 0.15 и наклоном 64.8° .

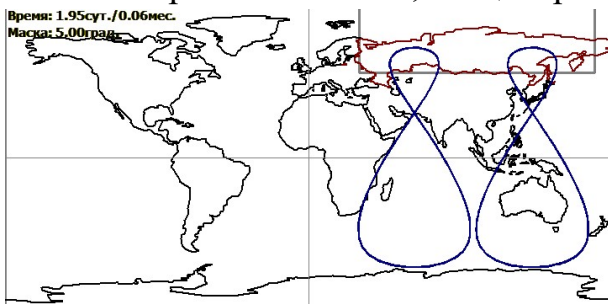


Рисунок 21 – Двухтрассовая группировка в трех орбитальных плоскостях по два КА

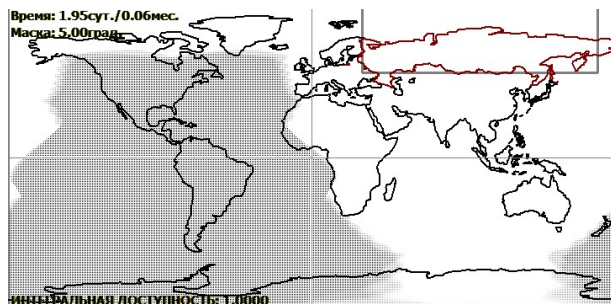


Рисунок 22 – Возможность непрерывного наблюдения

Таблица 2 – Результаты расчетов стратегии коррекции

ОГ	Корректируемый параметр	Число коррекц	Период, сут	Хар. скор. м/с	
Эллиптическая, $i = 64.8^\circ$	ГДВУ		7 ÷ 13	262 ÷ 496	5 ÷ 9
	Эксцентриситет	к номиналу	1 ÷ 6	600 ÷ 3070	24 ÷ 143
		на границу	1 ÷ 3	1200 ÷ 3070	48 ÷ 143
	Аргумент перигея	к номиналу	1 ÷ 5	665 ÷ 1915	44 ÷ 230
		на границу	1 ÷ 2	1330 ÷ 1915	87 ÷ 180

На рисунках 23–25 представлены характеристики орбит и результаты отработки стратегии коррекции для ОГ на высокоэллиптических орбитах с высотой апогея 30000 км, эксцентриситетом 0.7 и наклонением 64.8° .

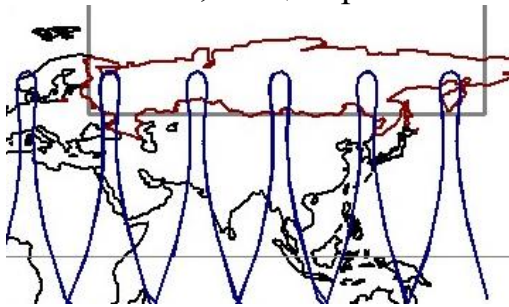


Рисунок 23 – Шеститрассовая группировка

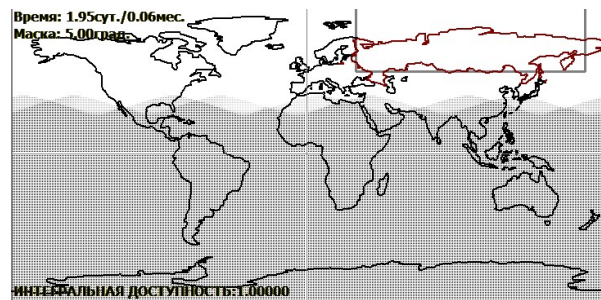
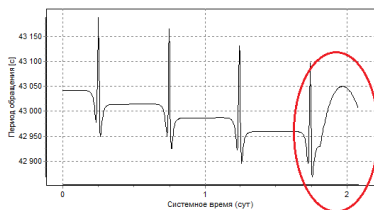
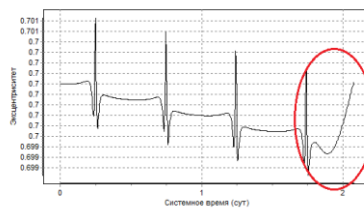


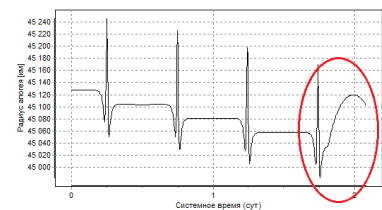
Рисунок 24 – Возможность непрерывного наблюдения



период обращения



эксцентриситет



радиус перигея

Рисунок 25 – Отработка стратегии коррекции

На рисунке 26 представлены результаты отработки стратегии проведения коррекции высоты для ОГ на круговых орбитах на высоте 510 км.

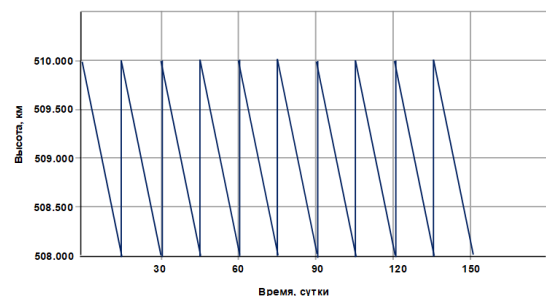


Рисунок 26 – Отработка коррекции высоты орбиты $h=510$ км.

Результаты отработки возможности формирования ограничений на проведение съемки, связанное с необходимостью расчета стратегии коррекций подтвердили правильность предложенных моделей и алгоритмов. Новизной здесь является то, что для подтверждения соответствующей методики и моделей были выбраны как хорошо известные низкие круговые и высокоэллиптические орбиты, так и перспективные типы высоких круговых и эллиптических орбит, позволяющие

при правильном формировании ОГ обеспечить круглосуточный мониторинг всей территории Российской Федерации, включая арктические области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат настоящего исследования состоит в разработке методики и новых научно обоснованных теоретических основ решения новой научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли, а также создании новых технических решений, внедрение которых имеет существенное значение для совершенствования отечественной космической системы ДЗЗ. Показано, что решение исходной задачи сводится к ряду новых частных подзадач, совместное решение которых позволяет обеспечить решение исходной.

1. В рамках предложенной методики решения основной задачи впервые проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы, по результатам которой:

- определены системные и потребительские характеристики ее элементов;
- определены основные рабочие процессы в системе;
- сформированы показатели эффективности системы, которые были разделены на группы: технические, функциональные и интегральные;

Обоснована возможность объективного свертывания показателей эффективности и перехода к двум частным, характеризующих целевое функционирование системы в целом: оперативности (времени) выполнения заявок потребителя на получение готового тематического продукта и стоимости готового тематического продукта. Обоснован выбор независимых переменных – системного времени и объема информации.

Результатом стало формальное представление задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как последовательности операций связанных с:

- формированием заявки;
- определением перечня запросов к системе, необходимых для выполнения заявки;
- определением процессов и последовательности их выполнения, которые будут обрабатывать соответствующие запросы;
- оптимизацией временного распределения процессов по элементам системы, с учетом выбранных показателей эффективности и имеющихся ограничений.

2. Сформулирована, обладающая новизной, математическая постановка оптимизационной задачи и определен перечень взаимосвязанным математических моделей, требующих разработки в рамках данной работы:

- модель заявки потребителя;
- модель процесса обработки информации космическим сегментом;
- модель обработки информации наземным сегментом;

- модель передачи данных.

Каждая из этих моделей описывает процесс обработки, в том числе определяет, что происходит с объемом информации и вычисляет системные показатели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

В результате единая модель обработки информации представлена как взаимосвязанная последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки, а математическая постановка задачи сведена к оптимизации маршрута прохождения заявки по графу. Сформулированы условия применимости предлагаемого подхода к решению задачи.

3. В интересах решаемой задачи сформирована единая математическая модель орбитальной группировки КА ДЗЗ, включающая в себя:

- модели съемки земных объектов
- модель передачи целевой информации между КА и ППИ
- модели целевой аппаратуры бортового информационного комплекса КА
- модель движения в задаче высокоточного определения и прогнозирования состояния КА;
- модель для определения стратегии орбитальных коррекций КА ДЗЗ.

В результате время, необходимое для проведения съемки отдельным КА по заявке определяется как совокупность суммарного времени проведения съемки, времени, необходимого для переориентации аппаратуры наблюдения и времени, необходимого для того, чтобы КА оказался в зоне взаимной радиовидимости с одним из ППИ.

Определено, что для рассматриваемых классов орбит имеют место следующие возмущения, требующие проведения коррекций: долгопериодическое возмущение гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла. В качестве алгоритма управления долготой восходящего узла предложено использовать полученный автором алгоритм, основанный на применении достаточных условий оптимальности. Особенностью данного алгоритма является то, что его линейная модель движения содержит два типа аддитивных возмущений — систематические неслучайные и случайные. Наличие в модели аддитивной неслучайной составляющей позволяет учесть дополнительные возмущения, которые отбрасываются при упрощении модели и ее линеаризации. Этим она отличается от традиционных моделей.

4. Впервые разработана единая форма представления моделей обработки информации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий связи как элементов единой информационной системы. Предложены способы программной реализации перечисленных моделей в рамках специализированного программно-моделирующего комплекса. При этом учитывалась необходимость обеспечения

возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели.

5. В рамках практической реализации методики предложен технический облик нового программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которого разработан комплекс программ, который позволяет решать следующие задачи:

- оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей, используя как скалярный (оперативность или стоимость), так и векторный критерий (оперативность + стоимость).
- автоматизированное формирование технологической карты – плана распределения обработки заявок потребителей по узлам космической системы ДЗЗ;
- проводить оценку текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы со штатной работоспособностью в будущем.

6. Существенную практическую значимость представляют результаты, подтверждающие состоятельность предложенного подхода к решению научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли, а именно:

- подтверждена возможность повышения общего уровня планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом;
- подтверждена возможность повышения уровня автоматизации распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом;
- подтверждена возможность оптимизации распределения процессов обработки результатов съемки по разным ППИ с учетом их производительности, а также территориального и временного факторов;
- подтверждена состоятельность системы взаимосвязанных математических моделей функционирования космического и наземного сегментов как элементов единой информационной системы;
- подтверждена состоятельность предложенного подхода к формированию стратегии коррекций КА ОГ ДЗЗ;
- представлена возможность анализа состава и топологии наземных центров с точки зрения определения основных показателей, что существенно упрощает проведения дальнейших системных исследований.

7. Все результаты подтверждены в ходе экспериментальной отработки. В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов существующей ЕТРИС ДЗЗ. Экспериментальная отработка проходила в несколько

этапов, наиболее важными прикладными результатами которой являются следующие:

- математическая модель и методика решения задачи распределения целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, включающей в себя разнотипные космические аппараты и наземный комплекс приема обработки и распределения информации успешно прошла экспериментальную отработку в условиях, приближенных к реальным с положительным результатом;
- результаты, полученные при экспериментальной отработке, в сравнении с решениями, используемыми Оператором системы, показали не только адекватное поставленным условиям поведение математической модели, но и привели к появлению нового решения, снижающего выбранные для оптимизации показатели оперативности и стоимости обработки заявки;
- программное обеспечение, реализующее разработанную математическую модель, обеспечивает широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам;
- разработанные математическая модель и методики распределения информационных потоков по составным частям космической системы ДЗЗ, а также созданное на их основе программное обеспечение может служить инструментом для обоснования направлений модернизации и унификации космической системы ДЗЗ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК:

1. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин* Результаты экспериментальной отработки математической модели распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 32-36

2. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин* Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 28-31

3. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В.* Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ, 2017, №96,

http://mai.ru/upload/iblock/8cc/Emelyanov_Malyshev_Smolyaninov_Starkov_rus.pdf

4. *Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В.* Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // Научно-технический вестник Поволжья №2 2018 с.74-79

5. *Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Фёдоров А.В.* Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения её функциональных возможностей // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш 2017. № 2 (95). С. 37-45.

6. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2012, № 57.

7. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Синтез оптимального управления при решении задачи удержания космического аппарата в орбитальной группировке // *Космонавтика и ракетостроение*, 2012, №4(69). ЦНИИмаш, с. 150-158.

8. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Программно-моделирующий комплекс для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*, 2012, №9, Москва: Издательский дом «СПЕКТР», с. 7-12.

9. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Орбитальные коррекции космических аппаратов при выполнении динамических операций // *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2013, №2, с.154-166.

10. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Методика актуализации банков данных объектов космического назначения // *Вестник Московского Авиационного Института*. Том 19. Выпуск №4, 2012

11. *Ахрамович С.А., Мальшев В.В., Старков А.В.* Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в Бикватернионной форме // *Общероссийский научно-технический журнал «ПОЛЕТ»*, №4 2018 с.9-20

12. *Ахрамович С.А., Баринов А.В., Мальшев В.В., Старков А.В.* Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17, № 2. С. 7-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22

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

1. *Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win.* Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // *IAA/AAS SciTech Forum 2018. Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. Volume 170, p. 495-503 (SCOPUS)

2. *Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V. T., Starkov A.V.* The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // *IAA/AAS SciTech Forum 2018. Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. Volume 170, p. 31-39 (SCOPUS)

3. *Malyshev V.V., Starkov A.V., Zay Yar Win.* The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, Vol. 10, 13-Special Issue, 2018, Pages: 53-58

4. *Malyshev V. V., Starkov A. V., Fedorov A. V.* Formation Keeping Strategy for a Quasi-Zenith GLONASS Complement // *3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems 2017. Advances in the Astronautical Sciences.*, CA, USA: Univelt Inc. Volume 161, 2017, p.1129-1140 (SCOPUS)

5. *Malyshev V.V., Starkov A.V., Fedorov A.V.* Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic Operations // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, Vol. 52, No. 2, pp. 313–325.

В других изданиях:

1. *Мальшев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Федоров А.В.* Управление группировкой спутников на высоких орбитах // *XXIV международная научная*

конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2019, с.177-178

2. *Мальшев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В.* Оперативное планирование съемки региона разнотипными КА // XXIV международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2019, с.189-191

3. *Гришанцева Л.А., Емельянов А.А., Зубкова К.И., Мальшев В.В., Старков А.В.* Оптимизация распределения процессов обработки данных ДЗЗ // XXIV международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2019, с.192-192

4. *Vin Z.Ya., Starkov A.V.* Determination of the appearance of the complementary orbital grouping of the global navigation satellite system // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018, С. 348-349.

5. *Мальшев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В.* Планирование целевого функционирования орбитальной группировки КА ДЗЗ с использованием генетического алгоритма // В книге: Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXIII международной научной конференции. 2018, С. 183-186.

6. *Мальшев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Федоров А.В.* Разработка стратегии поддержания группировки спутников на высоких орбитах // В книге: Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXIII международной научной конференции. 2018, С. 166-167.

7. *Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.* Анализ орбитальных группировок дополнения ГНСС, предназначенных для повышения функциональных возможностей региональных потребителей // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. - М.: Изд-во МАИ, 2017

8. *Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В.* Задача оптимального построения маршрута прохождения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям наземной инфраструктуры // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. - М.: Изд-во МАИ, 2017

9. *Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Мальшев В.В., Нгуен В.Х.Н., Старков А.В.* Разработка моделей процессов функционирования наземного сегмента обработки данных дистанционного зондирования Земли // В книге: Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXIII международной научной конференции. 2018, С. 189-190.

10. *Игнатович Е.И., Мальшев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Федоров А.В., Шмигирилов С.Ю.* Анализ вариантов построения высокоорбитального космического комплекса дополнения системы ГЛОНАСС // XXI международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. - М.: Изд-во МАИ, 2016

