

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»**

На правах рукописи



Морозов Александр Андреевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
СЕТЕВЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ
ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ**

Специальность: 2.3.1.

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
доцент А.В. Старков

Москва 2026

Оглавление

Введение.....	5
1 Формализация задачи планирования наблюдений в перспективных сетевых ОГ ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения.....	18
1.1 Анализ современной системы ДЗЗ, тенденции и перспективы ее развития.....	20
1.1.1 Современные космические средства ДЗЗ.....	24
1.1.2 Наземный комплекс приема, обработки и распространения информации	28
1.1.3 Информационные продукты ДЗЗ и заявки на съемку.....	34
1.1.4 Основные рабочие процессы.....	38
1.2 Подходы к решению задачи управления потоками целевой информации	41
1.2.1 Планирование съемки.....	47
1.2.2 Ретрансляция целевой информации.....	58
1.3 Анализ, формирование частных показателей эффективности и постановка частных задач распределения целевой информации космического сегмента КС ДЗЗ.....	61
1.3.1 Частные показатели эффективности и постановка задачи планирования съемки.....	64
1.3.2 Частные показатели эффективности и постановка задачи ретрансляции целевой информации	68
1.4 Сценарий функционирования модернизированной КС ДЗЗ при использовании сетевой архитектуры построения.....	71
1.5 Выводы по разделу	74
2 Методы и алгоритмы совместного решения задач планирования наблюдений и ретрансляции целевой информации в условиях высокой плотности объектов наблюдения.....	78

2.1	Планирование наблюдений в космических системах ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения	78
2.1.2	Подынтервалы планирования и упорядочивание КА в расчете совокупной стоимости	83
2.1.3	Программа изменения угла крена линии визирования каждого КА ДЗЗ на подынтервале планирования.....	85
2.2	Ретрансляция целевой информации в космических системах ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения	88
2.3	Выводы по разделу	95
3	Принципы построения и технический облик специализированного программного обеспечения	98
3.1	Методика построения и архитектура специализированного программного обеспечения	98
3.2	СПО решения задачи формирования плана съемки в условиях нагруженной целевой обстановки	103
3.3	СПО решения задачи ретрансляции целевой информации в сетевых спутниковых группировках.....	108
3.4	Выводы по разделу	117
4	Основные результаты экспериментальной отработки методик формирования опорного плана и ретрансляции целевой информации в условиях высокой плотности объектов наблюдения	119
4.1	Исходные данные.....	120
4.2	Экспериментальная отработка с анализом выходных данные модели.....	128
4.2.2	Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 6 КА.....	130
4.2.3	Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 6 КА.....	140
4.2.4	Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 6 КА	145

4.2.5	Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 12 КА.....	150
4.2.6	Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 12 КА.....	162
4.2.7	Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 12 КА.....	165
4.2.8	Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 18 КА.....	170
4.2.9	Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 18 КА.....	185
4.2.10	Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 18 КА.....	191
4.3	Выводы по разделу	197
5	Заключение	204
	Список сокращений и условных обозначений.....	206
	Список литературы	209
	Приложение	228

Введение

Актуальность темы исследования

Актуализация проблемы информационного суверенитета РФ в сегменте дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) продиктована динамикой потребительской среды и эволюцией функциональных требований к данным дистанционного зондирования. Текущая конъюнктура требует пересмотра подходов к обеспечению независимости в данной высокотехнологичной отрасли. Необходим пересмотр стратегии формирования перспективной орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) ДЗЗ. Ключевыми задачами российской отрасли остаются сохранение конкурентоспособности на всех сегментах рынка данных и планомерное улучшение тактико-технических характеристик систем в соответствии с меняющимися запросами потребителей [1, 2].

К числу ключевых технологических направлений в рассматриваемой области относится разработка и внедрение новых поколений КА и специализированного оборудования для космического наблюдения. Развитие данной тенденции обусловлено необходимостью повышения пространственного, временного и спектрального разрешения получаемых данных, а также расширения функциональных возможностей орбитальных средств мониторинга. Совершенствование бортовой аппаратуры сопровождается интеграцией новых технологических решений, в том числе, в части систем ориентации и стабилизации, средств передачи данных, а также целевой аппаратуры (ЦА) различного диапазона наблюдения. КА имеют на борту оптико-электронные и радиолокационные системы наблюдения нового поколения с расширенными возможностями. Заметна устойчивая тенденция к наращиванию численности КА, предназначенных для получения сверхдетальной съёмки земной поверхности. Существенное развитие демонстрируют коммерческие системы дистанционного зондирования Земли: прогнозируемый

уровень пространственного разрешения их целевой аппаратуры достигает 0,25 м.

Наблюдается переход от эксплуатации крупногабаритных дорогостоящих КА к внедрению малых спутников и их группировок. Приоритетным направлением становится формирование кластерных систем, объединяющих разнородные средства мониторинга. Базовым элементом таких систем станут малые КА массой от 100 до 400 кг, оснащенные оптико-электронной аппаратурой с разрешением до 0,75–6 м и радиолокационными средствами с разрешением до 6–30 м.

Рост рынка ДЗЗ и расширение круга его пользователей напрямую зависят от модернизации наземной инфраструктуры на основе внедрения облачных технологий, развития геопорталов и геосервисов, созданию распределенных сетей приема, обработки и распространения данных.

Основу рынка по-прежнему составляют оптико-электронные системы, однако, растет роль радиолокационных средств. Благодаря совершенствованию радаров с синтезированной апертурой (РСА), обеспечивающих всепогодную съемку высокого разрешения (включая Арктику), их роль значительно возрастает. Внедрение интерферометрии и многополяризационных режимов становится стандартом. Поскольку современные заказчики отдают приоритет оперативности и частоте обновления данных, а не их измерительной и информационной точности, рассматривается возможность развертывания «гибридной» орбитальной группировки спутников ДЗЗ.

На современном этапе жизненного цикла систем ДЗЗ ключевой тенденцией выступает формирование спутниковых группировок, отличающихся высокой производительностью съёмки. При этом наблюдается систематическое сокращение интервала повторной съёмки, что закономерно обуславливает экспоненциальный рост объёмов данных, циркулирующих в контуре космической системы ДЗЗ. Данная динамика предъявляет повышенные требования к пропускной способности каналов связи, а также к инфраструктуре хранения и обработки информации. [3, 4].

Текущее состояние российской системы ДЗЗ характеризуется неготовностью как орбитальной группировки, так и наземной космической инфраструктуры (НКИ) к формированию актуального, высокоточного и бесшовного покрытия территории страны в условиях резкого роста объемов данных [5]. Ключевыми сдерживающими факторами являются:

- неэффективная архитектура хранения информации;
- недостаточная производительность систем доступа к данным;
- отсутствие оперативного (онлайн) доступа к архивным материалам и необходимость их длительного восстановления;
- привязка процессов обработки к физическому месту хранения данных;
- отсутствие единых механизмов доступа к распределенным архивам и зависимость от качества каналов связи;
- недостаточная автоматизация тематической обработки;
- несовершенство алгоритмов распределения потоков целевой информации внутри системы ДЗЗ.

Это обуславливает необходимость строгой технической и математической формализации процессов целевого функционирования современных систем ДЗЗ. Ключевым направлением становится оптимизация планирования и повышение эффективности использования ресурсов системы. Эффективность целевого функционирования определяется комплексом факторов: составом и структурой ОГ, принципами её управления, а также алгоритмами обработки данных и механизмами доставки готовых тематических продуктов конечному потребителю. Особое значение в данном контексте приобретают технологии планирования съёмки и организации передачи информации, поскольку именно они задают основные ограничения и определяют достижимые показатели оперативности и полноты информационного обслуживания.

Вышесказанное обуславливает потребность в строгом техническом и математическом описании процессов работы современных систем ДЗЗ для повышения эффективности целевого функционирования. Результативность

работы таких систем определяется как архитектурой ОГ и методами управления ею, так и качеством обработки и доставки данных потребителю.

В этом контексте критически важными становятся задачи оптимизации планирования съемки и передачи информации. Следовательно, актуальной задачей является модернизация методологий планирования и каналов передачи данных в наземный сегмент с учетом современных требований. В такой комплексной постановке до настоящего времени данного рода задачи не решались в проектировании систем ДЗЗ, особенно это касается условий высокой плотности объектов наблюдения (нагруженной целевой обстановки) при большом количестве КА ДЗЗ. Под высокой плотность объектов наблюдения понимается состояние системы, при котором количество одновременных заявок потребителей в расчете на единицу площади (или времени) превышает располагаемую пропускную способность КА ДЗЗ.

Степень разработанности темы исследования

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В.Т. Бобронниковым, А.А. Емельяновым, К.А. Заниным, В.В. Малышевым, О.П. Нестеренко, Ю.Н. Разумным, Г.Г. Райкуновым, В.А. Селиным, Ю.А. Смольяниновым, А.В. Старковым и др., позволил определить особенности построения и функционирования систем ДЗЗ, пути исследования, найти методы решения поставленной задачи. В трудах указанных и ряда других исследователей представлены фундаментальные теоретические основы построения сложных информационных систем ДЗЗ. Существенное внимание уделено подходам к управлению потоками целевой информации, а также разработке моделей движения КА и принципов их управления. Кроме того, детально рассмотрены вопросы функционирования целевой аппаратуры и служебных систем КА, включая алгоритмы и технологические цепочки обработки данных ДЗЗ.

Вместе с тем, кратное увеличение ОГ КА ДЗЗ с одновременным существенным увеличением количества конкурентных заявок требует адаптации существующих методологических подходов к новым условиям применимости.

Появилась необходимость комплексного пересмотра технологий планирования съемки и передачи целевой информации в наземный сегмент. В такой постановке до настоящего времени данного рода задачи не решались в проектировании систем ДЗЗ, особенно это касается нагруженной целевой обстановки при большом количестве КА ДЗЗ и объектов съемки.

Объект исследования

Космическая система (КС) ДЗЗ, ключевой функцией которой выступает формирование и передача конечного информационного продукта потребителю.

Предмет исследования

Совокупность алгоритмических и программных решений, обеспечивающих эффективное распределение потоков целевых данных в рамках функционирования космического сегмента системы ДЗЗ как сложной информационной структуры.

Цели и задачи работы

Целью диссертации является повышение эффективности работы со сверхбольшими, постоянно растущими объемами информации в космическом сегменте системы ДЗЗ.

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

1. Проводится системный анализ и формализация задачи управления потоками целевой информации перспективных сетевых ОГ ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения, выявляются узкие места и направления развития методологии управления потоками целевой информации, а также требующие дальнейшей формализации основные объекты и рабочие процессы системы.

2. Проводится анализ и формируются частные показатели эффективности, формулируются техническая и математическая постановка оптимизационных задач.

3. Для решения поставленных частных задач разрабатывается система взаимоувязанных математических моделей и алгоритмов решения задач,

связанных с планированием съемки и дальнейшей ретрансляцией ее результатов на объекты наземной космической инфраструктуры.

4. Определяются принципы построения и технический облик специализированного программного обеспечения.

5. С помощью созданного специализированного программного обеспечения (СПО) на реальных данных, в условиях высокой плотности объектов наблюдения, проводится экспериментальная отработка методик формирования опорного плана и ретрансляции целевой информации.

Научная новизна работы

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

1. Предложена система единых, взаимосвязанных моделей и алгоритмов расчета частных показателей эффективности для рассматриваемых элементов системы.

2. Предложены новые методы и алгоритмы решения задачи планирования наблюдений, позволяющие решать оптимизационную задачу для значительного числа объектов наблюдений и космических аппаратов орбитальной группировки фиксированной размерности.

3. Впервые сформирована методика использования межспутниковых линий связи (МЛС) для передачи целевой информации в перспективной отечественной космической системе ДЗЗ.

4. Предложены новые алгоритмы решения задачи ретрансляции целевой информации с использованием МЛС в условиях высокой плотности объектов наблюдения.

5. Определены требования, предъявляемые к СПО, принципы его построения и технический облик. Разработана методика проведения экспериментальной отработки.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологического подхода к управлению потоками целевой информации в КС ДЗЗ в части учета

сложной объектовой обстановки и появления новых, перспективных межспутниковых каналов передачи целевой информации.

Практическая значимость работы

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования полученных выводов для совершенствования существующих и проектирования перспективных систем ДЗЗ. Практическая значимость заключается в следующем:

1. Подтверждена возможность повышения эффективности распределения информационных потоков целевой информации в системе ДЗЗ.

2. Предложены решения для повышения автоматизации распределения потоков целевой информации в отношении планирования работы аппаратуры наблюдения и передачи данных.

3. Предложен комплексный подход к математическому моделированию, объединяющий наземный и космический сегменты в единую информационную среду.

4. Представлена возможность анализа состава и топологии орбитальных группировок с точки зрения определения основных показателей целевого использования и проведения дальнейших системных исследований.

5. Все предложенные в работе методы и алгоритмы реализованы в виде СПО, имеющего открытую архитектуру и позволяющего более комплексно, по сравнению с существующими аналогами, решать задачи планирования наблюдений и межспутниковой передачи информации в КС ДЗЗ.

Методология и методы исследования

Для исследования поставленной задачи используется системный подход. Модели и алгоритмы функционирования космического и информационных сегментов формируются отдельно как составные части КС ДЗЗ, обосновывается выбор показателей эффективности и ограничений, с использованием которых решаются частные оптимизационные задачи с последующей отработкой в рамках программного средства, позволяющего решать круг практических задач по распределению потоков целевой информации.

Методологическую базу исследования составляют системный анализ динамики полета, аппарат теории управления и теории графов, а также методы оптимального управления и обработки данных. Программная реализация разработанных моделей и алгоритмов базируется на принципах объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретические основы и методический подход к решению задачи управления потоками целевой информации в космическом сегменте системы ДЗЗ, как сложной организационно-технической информационной системы, основной задачей которой является формирование и реализация рациональных планов наблюдений с последующей их передачей в комплекс НКИ.

2. Перечень частных показателей эффективности, технической и математической постановок оптимизационных задач планирования съемок и ретрансляции полученной целевой информации.

3. Архитектура и состав взаимосвязанных математических моделей, составляющие основу процессов планирования и ретрансляции в космическом сегменте системы ДЗЗ.

4. Методика построения и технический облик СПО, предназначенного для построения рациональных планов съемки и передачи данных, на основе которых автором разработан комплекс программ.

5. Результаты экспериментальной апробации методик построения опорного плана и передачи целевых данных в условиях высокой плотности объектов наблюдения:

– доказана корректность предложенных математических моделей и методик, охватывающих взаимодействие разнородных космических аппаратов и наземной инфраструктуры обработки данных;

– подтверждена высокая гибкость моделируемой системы, позволяющая оперативно изменять её конфигурацию и технические параметры;

– обоснована применимость разработанного программного обеспечения в качестве инструментария для планирования модернизации и унификации действующих систем ДЗЗ.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность и надёжность результатов исследования опираются на строгую математическую постановку задач и последовательное применение методов системного анализа, теории управления, теории графов и оптимального управления, а также на современные подходы к работе с данными. Важным элементом подтверждения достоверности стало частичное сопоставление созданных методик и алгоритмов с проверенным на практике программно-математическим обеспечением, используемым в Научном центре оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» при решении задач комплексного применения перспективных космических систем ДЗЗ и при моделировании распределения информационных потоков внутри этих систем. Результаты работы внедрены в технологический контур Оператора космических систем ДЗЗ (Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»), что подтверждается актом, приведенном в Приложении.

Основные результаты диссертации прошли апробацию на научных семинарах на кафедре «Системного анализа и управления» МАИ, в рамках докладов на международных и российских конференциях, а также научных статей.

Личный вклад и публикации

Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором в процессе его научной деятельности. Проведённые исследования охватывают полный цикл научной работы: от формализации и постановки задачи (в том числе технической и математической) до разработки моделей, применения вычислительных методов, создания программного комплекса, проведения расчётов и последующего анализа результатов. В публикациях, подготовленных в соавторстве, автор сыграл определяющую роль в постановке задачи, выборе исследовательских направлений и методов, выполнении

аналитических расчётов, а также в интерпретации и анализе полученных данных, и в подготовке текста статьи. В диссертацию включён исключительно авторский материал; все использованные сторонние результаты обозначены соответствующими ссылками.

Основные результаты опубликованы в 14 работах, в том числе 5 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК соответствующих научной специальности 2.3.1., 3 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК, которые с 25.05.2022 г. соответствуют научной специальности 2.3.1. 3 публикации входят в международные системы цитирования Scopus и Web of Science. Кроме того, им сделаны 5 докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников.

Диссертация содержит 227 страниц, 69 рисунков, 41 таблицу. Список использованных источников содержит 108 наименований, 1 приложение на 2 листах.

Основное содержание работы

В первой главе проведён анализ современного состояния КС ДЗЗ, перспектив дальнейшего развития, определены основные тенденции совершенствования отечественной группировки КА наблюдения, предложены дальнейшие варианты развития единого методического подхода к решению задачи управления потоками целевой информации, в основе которых лежит совместное решение двух частных задач планирования съемки и ретрансляции целевой информации. Для обеих задач проведен их анализ, сформированы частные показатели эффективности, сформулирована математическая постановка задачи. Предложен сценарий функционирования многоспутниковой КС ДЗЗ. Создан методический задел для формирования программно-математической модели, которая позволит моделировать любую КС ДЗЗ для

определения рационального состава космической группировки и состава наземных комплексов приема данных ДЗЗ.

Во второй главе представлены методы и алгоритмы решения задач планирования наблюдений в условиях высокой плотности объектов наблюдения. Методика предполагает разделение задачи планирования на две взаимоувязанные подзадачи: планирование процессов съемки земной последовательности и дальнейшая ретрансляция целевой информации на Землю с использованием существующих и перспективных каналов обмена информацией, в частности, на основе межспутниковых каналов связи. Разработана методика определения системных показателей эффективности: условной стоимости работы КА ДЗЗ и оперативности получения информации.

Условная стоимость работы КА ДЗЗ формируется за счет проведения наблюдений регионов интереса. В рамках совершенствования методик планирования наблюдений предложены следующие ключевые направления:

- замена традиционного полигонального описания приоритетных районов на геопривязанное растровое представление, при котором каждой ячейке раstra ставится в соответствие индивидуальная «условная стоимость»;
- декомпозиция общей задачи планирования на три взаимосвязанные подзадачи: формирование исходных данных (включая построение матрицы стоимости), расчёт временных параметров ключевых событий, а также решение задачи планирования съёмки с использованием группировки КА ДЗЗ на заданном временном интервале;
- создание устойчивых оптимизационных процедур, ориентированных на снижение размерности вектора оптимизируемых параметров, что повышает вычислительную эффективность и стабильность результатов.

В условиях нагруженной целевой обстановки ретрансляция подразумевает управление совокупностью способов информационного обмена при доставке целевой информации, позволяющее совмещать традиционные способы передачи типа КА→ППИ с возможностями МЛС. Решение такой задачи представляет

ретрансляцию с маршрутизацией целевой информации от КА ДЗЗ источника в наземный сегмент на основе информационного взаимодействия КА, входящих в ОГ ДЗЗ.

В третьей главе представлена методика и архитектура комплекса программ моделирования планирования съемки ДЗЗ и передачи целевой информации на Землю в автоматизированном режиме. Это позволяет решать следующие задачи:

- формирование перечня возможных маршрутов съемки для каждого заданного КА ДЗЗ, в соответствии с заданными регионами интереса и учетом работы ЦА наблюдения;
- формирование плана работы каждого КА ДЗЗ / КА связи системы для выполнения целевых задач ДЗЗ;
- формирование плана работы НКИ для приема сгенерированной ЦИ;
- проведение оценки загруженности межспутниковых и наземно-космических каналов связи, отдельных КА и ППИ для выявления возможных проблем при использовании заданной конфигурации КС.

Предложен состав комплекса программ, состоящий из:

- базы данных (БД) для хранения конфигурации исходных данных (ИД);
- СПО планирования съемки ДЗЗ для формирования перечня возможных съемок (периодов включения ЦА съемки);
- СПО распределения ЦИ ДЗЗ для моделирования распределения ЦИ ДЗЗ между различным узлами КС с целью доставки ЦИ ДЗЗ от КА ДЗЗ на Землю и формирования опорного плана работы заданной ОГ КА, учитывая загруженность при выполнении передачи ЦИ.

Предложена архитектура работы СПО для масштабируемого роста мощности вычислений в зависимости от используемых технических характеристик АРМ моделирования.

В четвертой главе проведена экспериментальная отработка на 9 различных вариантах конфигураций КС ДЗЗ, различающихся между собой количеством КА в ОГ, а также наличием межспутниковой связи и возможности записи целевой

информации (ЦИ) в бортовое запоминающее устройство (БЗУ) «промежуточных» КА. В ходе экспериментальной отработки и моделирования различных вариантов группировок и схем распределения информационных потоков были рассчитаны цифровые копии реальной КС с КА типа «Канопус». Показана низкая эффективность использования уже отработанных стратегий проектирования КС с большим количеством КА. Но по мере наращивания КА в группировке значительно повышается эффективность использования МЛС для распределенной передачи данных, что может значительно повысить эффективность всей системы.

1 Формализация задачи планирования наблюдений в перспективных сетевых ОГ ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения

Одной из основных тенденций развития ДЗЗ на современном этапе жизненного цикла является создание группировок спутников для значительного увеличения производительности и сокращения интервала повторной съемки, что приводит к колоссальному увеличению объемов данных [3, 6-10].

Из-за наличия высокого спроса, к данным ДЗЗ формируются все новые и новые требования, одним из наиболее важных требований является оперативность получения данных.

Анализ тенденций развития современных систем ДЗЗ свидетельствует о трансформации их роли: они выходят за рамки исключительно источников космических снимков в разных спектральных диапазонах и с различным разрешением. Сегодня системы ДЗЗ эволюционируют в полноценные информационные системы (ИС), интегрирующие не только средства получения космической информации, но и инструменты её хранения, обработки, формирования тематических продуктов, а также каналы доставки этих продуктов конечным пользователям. Это обеспечивается за счет объединения функционалов [11-17]:

- управления целевым применением КА ДЗЗ;
- приема информации;
- обработки информации и формирования тематического продукта;
- передачи результатов конечным потребителям.

В информационном поле вышеперечисленные функционалы являются акторами потоков ЦИ в КС ДЗЗ.

Под потоком целевой информации в рамках функционирования КС ДЗЗ подразумевается упорядоченная последовательность операций по приёму, передаче и обработке данных. Эти операции выполняются с соблюдением регламентированных правил, а их результаты последовательно доводятся от

источника до конечного потребителя; итоговым результатом выступает готовый тематический продукт [18–22].

Структура КС ДЗЗ включает три ключевых компонента:

- космический сегмент — обеспечивает формирование первичного массива информации с заданным уровнем предварительной обработки.

- распределённый наземный комплекс — объединяет средства приёма, обработки и распространения данных; его финальная задача — сформировать тематический продукт, адаптированный под потребности пользователя.

- средства передачи данных — обеспечивают связность системы: они гарантируют своевременную и надёжную доставку информации между космическими и наземными элементами.

ИС ДЗЗ реализует три основные функциональные группы задач:

- 1) планирование и управление процессами получения данных ДЗЗ, включая:

- координацию использования ОГ КА ДЗЗ посредством распределения ресурсов и взаимоувязанного планирования съёмов в соответствии с целевыми задачами;

- комплексное планирование сеансов связи для передачи ЦИ;

- согласованное управление наземными средствами ДЗЗ;

- координацию поставок материалов с зарубежных КА ДЗЗ для государственных потребителей.

- 2) приём, регистрация и обработка всего объёма космической информации, поступающей с КА различных типов.

- 3) хранение, распространение и обеспечение доступа к данным ДЗЗ, а именно:

- архивирование и долговременное хранение информации, полученной как с отечественных, так и с зарубежных КА ДЗЗ;

- предоставление пользователям доступа к данным через сеть геопорталов.

На текущем этапе установлена объективная неготовность КС ДЗЗ как ИС к масштабированию: в частности, к кратному увеличению численности КА и росту объёма заявок потребителей [23-28]. В качестве перспективных направлений преодоления данного ограничения рассматриваются два взаимосвязанных подхода. Во-первых, повышение оперативности передачи информации между узлами КС ДЗЗ, что позволит сократить задержки в доставке данных и повысить актуальность информации. Во-вторых, переход от монокритериальной оценки (ориентированной исключительно на оперативность выполнения заявки) к векторному показателю эффективности, интегрирующему несколько аспектов, включая условную стоимость передаваемой информации. Под условной стоимостью понимается неформальная свёртка важности данных для совокупности заинтересованных потребителей, отражающая их приоритетность и совокупную ценность в рамках решаемых задач.

Второй аспект имеет существенное значение: при естественном отставании темпов развития космического сегмента от динамики роста числа конкурентных заявок существенно возрастает частота возникновения задач многофакторной оптимизации. Их решение становится критически важным для эффективного распределения ограниченных ресурсов системы.

1.1 Анализ современной системы ДЗЗ, тенденции и перспективы ее развития

В настоящее время информационные ресурсы являются одним из наиболее важных факторов эффективности социально-экономических систем на макро- и микроуровне. Одними из наиболее востребованных информационных ресурсов являются данные о земной поверхности, полученные с помощью КА ДЗЗ.

В настоящее время данные космической съёмки характеризуются высокой степенью доступности для широкого круга пользователей и находят активное применение как в научной, так и в производственной сферах. ДЗЗ выступает одним из ключевых источников актуальной и оперативной информации,

интегрируемой в геоинформационные системы. Существенный прогресс в области создания и совершенствования КС, а также в технологиях получения, обработки и интерпретации данных ДЗЗ привёл к значительному расширению спектра прикладных задач, решаемых с использованием этих данных.

Получение необходимых данных о состоянии земной поверхности посредством съемки из космоса связано с необходимостью значительно сократить временные и материальные затраты, а также увеличить достоверность и точность данных. Именно космические данные ДЗЗ обладают наибольшей практической значимостью для широкого спектра отраслей — от лесного хозяйства и метеорологии до экологического надзора. Наглядный пример — лесной мониторинг: появление развитых технологий космической съёмки качественно изменило возможности контроля лесных ресурсов. Раньше специалистам было крайне сложно отслеживать незаконные вырубки, своевременно выявлять лесные пожары и контролировать состояние реликтовых лесов, а доступные топографические данные зачастую не покрывали всю необходимую территорию. Сегодня эти ограничения во многом преодолены благодаря данным ДЗЗ. Помимо вышеперечисленных плюсов у ДЗЗ существует немаловажный фактор масштабности. Аппаратура, находящаяся на спутниках ДЗЗ в виде полезной нагрузки, позволяет получать данные высокого разрешения с высоким территориальным охватом. Эти данные все чаще применяются для анализа текущего состояния и прогнозирования климатических изменений, а также природных условий в виде различных стихийных бедствий, анализа состояния водоемов, решаются задачи оборонного и социально-экономического характера.

При этом отрасль ДЗЗ характеризуется цепочкой создания стоимости, сконцентрированной в отдельных экосистемах:

- инфраструктурная экосистема - это предприятия и компании, входящие в инфраструктуру спутникостроения, изготовления, запуска и управления на орбите КА ДЗЗ, наземная инфраструктура приема, хранения, обработки и распределения данных ДЗЗ;

– экосистема использования инфраструктуры - компании и организации, эксплуатирующие инфраструктуру приема, архивирования и обработки космической информации ДЗЗ;

– экосистема применения космической информации - компании и организации, предлагающие информационные сервисы на базе продуктов с добавленной стоимостью через веб-платформы и облачные сервера хранения и обработки продуктов ДЗЗ.

Динамика мирового рынка ДЗЗ характеризуется не только количественным ростом, но и глубокой структурной перестройкой. Наиболее значимым направлением преобразований становится развитие сегмента цифровых услуг, в рамках которого интегрируются возможности космической съёмки и передовые технологические решения — в частности, методы искусственного интеллекта (ИИ), геоинформационные системы (ГИС), а также навигационные и связные технологии. Такая конвергенция формирует новые форматы предоставления данных и расширяет спектр прикладных решений на базе ДЗЗ. Кроме того, ожидается создание новых приложений и услуг. По оценкам экспертов, рост сегмента таких услуг будет происходить опережающими темпами и в ближайшие 5 лет он вырастет не менее чем в три раза [23, 29-37]. Важным условием развития рынка услуг является преемственность и непрерывность обеспечения данными, а это требует обеспечивать финансирование создания новых систем на замену существующим.

Государственные организации или организации с преобладающей долей участия государства останутся основными структурами, обеспечивающими дальнейшее развитие как самих КС, так и всего рынка, ориентированного на приоритетное удовлетворение потребностей государства в данных космической съёмки. Поэтому, несмотря на привлечения частного капитала и увеличение числа коммерческих пользователей, сохранится тенденция создания систем двойного (гражданского и военного) назначения при участии частного капитала. К примерам подобной деятельности можно отнести услуги, предоставляемые

компаниями Astrium Geo-Information Services, DigitalGlobe, GeoEye, e-GEOS. В коммерческой сфере наиболее востребованными останутся снимки с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением.

К ведущим странам в области съемки Земли из космоса можно отнести восемь государств: США, Китай, Европа, Япония, Индия, Россия, Израиль, Корея. Все перечисленные ведущие страны обладают собственной ракетно-космической промышленностью, разрабатывают и запускают КА ДЗЗ с национальных космических полигонов собственными носителями. Другие страны являются операторами небольших группировок (до 5 КА ДЗЗ), которые зачастую изготовлены при зарубежном содействии или «под ключ».

Мировым лидером по числу КА ДЗЗ классов микро-, мини- и выше становится Китай, и в перспективе разрыв между ним и остальными странами будет расти. Страны Европейского союза совместно разрабатывают и эксплуатируют КА ДЗЗ среднего разрешения. Национальные космические агентства шести лидирующих в области ДЗЗ стран ЕС финансируют разработку КА ДЗЗ для решения своих национальных задач и для работы на мировом рынке ДЗЗ. Важной мировой тенденцией отрасли ДЗЗ является увеличение числа стран — операторов спутников и систем ДЗЗ (обычно благодаря запускам национальных малоразмерных КА ДЗЗ, начиная с «кубсатов»), что, в свою очередь, приводит к росту спроса на разработку систем ДЗЗ «под ключ» с последующей передачей технологий.

В США региональный рынок поделен между двумя крупнейшими операторами — GeoEye и DigitalGlobe. В Европе 77% всего объема доходов приходится на Astrium GeoInformation Services. В совокупности эти три оператора контролируют более 65% мирового рынка данных ДЗЗ. Крупнейшими региональными рынками ДЗЗ в ближайшие годы будут оставаться Северная Америка и Европа.

Объем государственных инвестиций будет высоким с учетом растущей актуальности оборонных программ и программ экономической и социальной направленности, в частности по контролю использования природных ресурсов и

состояния окружающей среды. Ожидается появление новых операторов спутниковых систем. Около 40 стран и организаций являются владельцами и операторами КА ДЗЗ, а общее число спутников ДЗЗ на орбите превышает 600 шт., включая «кубсаты» (наноспутники в форме куба с ребром 10 см и массой ~1 кг) и тяжелые многотонные аппараты с полезной нагрузкой для съемки поверхности Земли, а также для зондирования атмосферы, ионосферы и океанов [38-47]. В то время, как в 2009 г. число таких стран не превышало 26. Увеличение интереса к аппаратам ДЗЗ обусловлено значением подобных систем для решения задач национальной безопасности, экономического развития стран.

В число стран, имеющих собственные КА ДЗЗ высокого разрешения, вошли Турция (GokTurk), Испания (SEOSAT-INGENIO), Казахстан, Мексика и другие. В России создание ОГ КА ДЗЗ ведется в соответствии с национальным проектом «Развитие космической деятельности Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [48-52].

Таким образом, современный мировой рынок данных и продуктов ДЗЗ находится на стадии бурного роста. На рынок выходят новые игроки, демонстрирующие новые подходы и предоставляющие новые сервисы, услуги в области высокочастотного наблюдения и решения комплекса прикладных задач. Формируются новые потребности, связанные, главным образом, с новыми возможностями ДЗЗ.

1.1.1 Современные космические средства ДЗЗ

Основой современной КС ДЗЗ является существующая ОГ КА ДЗЗ, состоящая из работающих в данный момент времени КА и их ЦА. Космический сегмент спутниковой системы мониторинга представляет собой группировку упорядоченно расположенных на орбитах спутников, совместно выполняющих поставленные перед системой задачи, имеющих возможность оперативной передачи данных через антенно-фидерные устройства (АФУ). Данные КА ДЗЗ окружают нашу планету, работая в различных типах орбит выполняя целевые операции съемки и сброса данных. Отечественная группировка, по состоянию на

август 2026 года, состоит из следующих типов КА ДЗЗ – рисунок 1.1, используемых в штатной эксплуатации:

- «Аист-2Т», 2 КА на солнечно-синхронной орбите (ССО);
- «Арктика-М», 2 КА на высокоэллиптической орбите (ВЭО);
- «Грифон», 4 КА на ССО (на стадии летных испытаний) [53];
- «Канопус-В», 5 КА на ССО;
- «Кондор-ФКА», 2 КА на ССО;
- «Метеор-М», 2 КА на ССО;
- «Ресурс-П», 2 КА на ССО;
- «Обзор-Р», 1 КА на ССО;
- «Электро-Л», 4 КА на ГСО.



Космические аппараты типа «Канопус-В»



Космический комплекс «Метеор-3М»



Геостационарный гидрометеорологический космический комплекс «Электро-Л»



Космический комплекс «Арктика-М»

Рисунок 1.1 – Некоторые типы КА, находящиеся в штатной эксплуатации отечественной ОГ КА ДЗЗ

Каждый КА ДЗЗ, что из приведенного выше списка или же иностранного производства обладает своими параметрами орбиты и ЦА, способные охарактеризовать осуществляемые целевые операции. Подробное рассмотрение

характеристик и как они будут учитываться в работе приводится в разделах 1.2 – 1.4.

Отечественная ОГ КА ДЗЗ в настоящее время характеризуется относительно небольшим числом спутников. Вместе с тем, реализация национального проекта «Космос» (в рамках федерального проекта «Спутниковая связь и наблюдение за Землёй») предусматривает формирование современной инфраструктуры коммуникаций и мониторинга. Это позволит существенно расширить действующую ОГ КА ДЗЗ за счёт включения в её состав дополнительных мониторинговых аппаратов, а также спутников связи, тем самым повысив пространственно-временное покрытие и оперативность предоставления данных. В материалах, найденных в открытых источниках нацпроекту «Космос», значится различное количество КА (не менее 900 КА связи и 300 КА ДЗЗ единовременно) [54-55], но объединяет их одно – количество КА будет значительно превышать существующее в настоящий момент времени. Следует отметить трансформацию ключевого критерия функционирования орбитальной группировки КА ДЗЗ. Если ранее приоритетом выступало использование ограниченного числа аппаратов для максимизации площади покрытия либо обеспечения заданной периодичности пролёта над регионом интереса, то современный подход ориентирован на применение объединённой группировки КА. Её цель — обеспечивать максимально оперативные данные по любому потенциально значимому региону. В условиях существенного наращивания космического сегмента главным критерием эффективности новой интегрированной системы становится оперативность исполнения заявок потребителей.

Способность объединённой ОГ оперативно исполнять заявки потребителей обуславливает появление новых эксплуатационных задач. В частности, система должна обеспечивать приоритетную обработку наиболее срочных заявок в сжатые сроки, гарантируя при этом достаточный уровень достоверности получаемой ЦИ. Ключевыми проблемами при реализации такого режима выступают: необходимость оперативной корректировки

индивидуальных рабочих программ каждого космического аппарата, а также внедрение МЛС для ускорения обмена информационными потоками между наземным сегментом и группировкой.

Такого рода проблемы, до настоящего момента не считались наиболее важными в рамках систем ДЗЗ. В настоящее время, с учетом небольшого количества КА в группировке – планирование работы каждого КА осуществляется с использованием предельно низкого уровня автоматизации процесса. При существенном масштабировании ОГ КА ДЗЗ, когда её численность может значительно превысить 100 аппаратов, а число потенциально возможных сценариев передачи управляющей и ЦИ — более 1000 вариантов, критически возрастает необходимость повышения уровня автоматизации процессов управления. Слабое автоматизированное планирование в таких условиях становится нереализуемым из-за экспоненциального роста комбинаторной сложности задач распределения ресурсов и маршрутизации данных.

Однако, для определения рационального состава ОГ КА ДЗЗ, требуются модельные расчеты, которые смогли бы показать некоторые характеристики систем, позволяющие оценить степень загруженности каждого узла системы, общее время работы и понять всю «стоимость» системы. Данная задача до настоящего момента не решалась подобным образом – каждый новый КА ДЗЗ был фактически собран «вручную» и не предполагал возможность серийной сборки в рамках одного большого проекта.

В качестве основного примера при разработке группировки можно привести одну и наиболее известных космических систем связи – Starlink. Сама космическая группировка, в начале своего срока эксплуатации использовала методы группировки связи Iridium с передачей данных от абонента к КА до наземного терминала (шлюза) и от терминала на другой КА, пока не дойдет точки своего назначения. Новое поколение спутников Starlink (v1.5, v2 Mini) оснастили лазерной системой спутниковой связи, способной создавать МЛС между каждым КА системы, что позволит исключить необходимость в

использовании наземных шлюзов с целью значительного повышения скоростей передачи данных. Также спутники системы Starlink являются первыми, по-настоящему серийными спутниками, что, по оценкам различных экспертов, позволило значительно снизить стоимость каждого спутника в отдельности.

Возвращаясь к системам ДЗЗ, такого рода возможности систем не было предусмотрено ни у одной из известных на сегодняшний момент времени ОГ КА ДЗЗ. Проектирование настолько сложных с технической и эксплуатационной точки зрения систем необходимо начинать с моделирования рационального состава системы, позволяющего комплексно оценить такие параметры как:

- среднеоценочную стоимость системы, при условии наличия примерных цен на одну единицу;
- оперативность работы системы (может показать среднее время выполнения съемки по заявкам), в том числе с учетом перспективного межспутникового взаимодействия с целью передачи данных;
- необходимость дооснащения, создания новых узлов или использования уже развитой НКИ (что значительно может влиять на производительность всей системы);
- условную стоимость конечного информационного продукта.

Данного рода задачи не решались в проектировании систем ДЗЗ и требуют разработки соответствующих новых научно-обоснованных технических решений.

1.1.2 Наземный комплекс приема, обработки и распространения информации

В настоящее время существует достаточно большое количество различных распределенных по территории Земли наземных сегментов, используемых операторами эксплуатирующими КС. В качестве примера, для рассмотрения и составления представления о том, что же должна из себя представлять модель

наземного сегмента при рассмотрении всей КС предлагается использовать отечественную модель ЕТРИС ДЗЗ, рисунок 1.2.

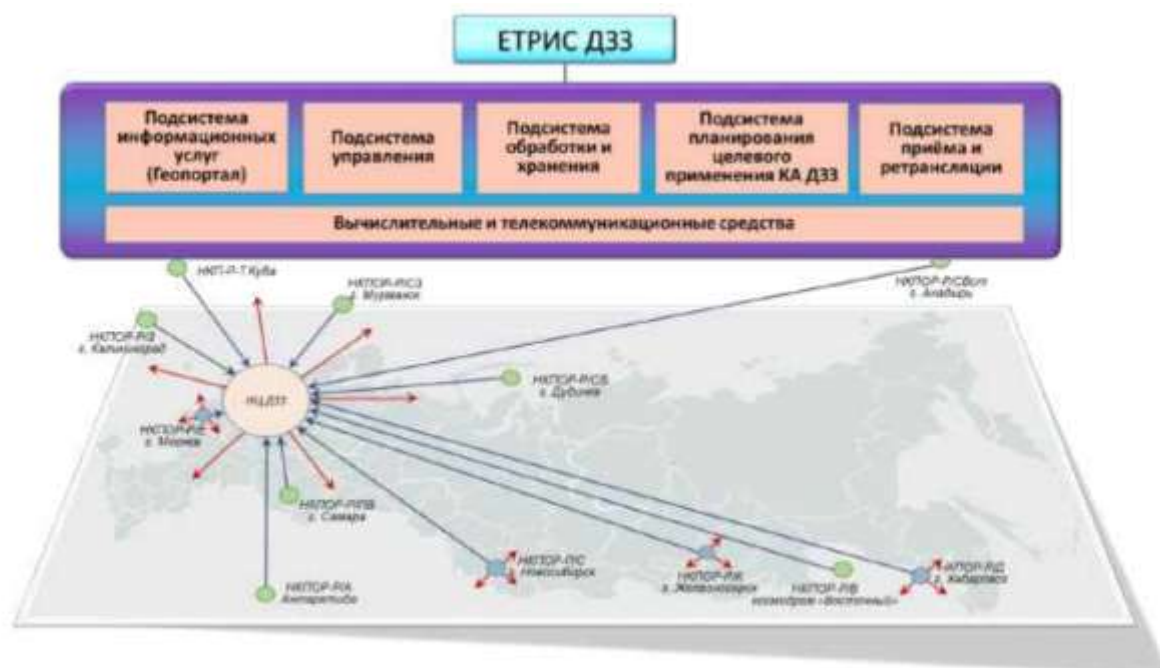


Рисунок 1.2 – Функциональный состав ЕТРИС ДЗЗ [56]

Основу отечественного НКИ ДЗЗ составляет ЕТРИС ДЗЗ, состоящая из распределенных наземных комплексов приема, передачи и обработки данных на территории России, Кубы и Антарктиды. Каждый наземный комплекс характеризуется наличием аппаратно-программных средств, позволяющим принять и расшифровать данные ДЗЗ. Наиболее развитые комплексы, в свою очередь, имеют в своем составе ЦОДы и штат операторов-обработчиков, позволяющие обрабатывать полученные данные до соответствующего уровня. В рамках настоящей работы наиболее важным элементом в модели наземного комплекса является приемный комплекс (ПК), позволяющий на аппаратно-программном уровне осуществить прием данных с ОГ КА ДЗЗ. В качестве примера описания характеристик ПК – в таблице 1.1 приведены характеристики ПК на базе антенны с рефлектором 5 м., на рисунке 1.3 – фото рассматриваемого ПК.



Стационарное исполнение антенной системы под РПУ



Рисунок 1.3 – Фотография ПК на базе антенны с рефлектором 5 м

Таблица 1.1 – Технические характеристики ПК на базе антенны с рефлектором 5 м [57]

Параметр	Значение
Антенный комплекс	
Рефлектор, D, м (схема Кассегрена)	5
Схема построения опорно-поворотного устройства	Азимутально-угломестная с третьей осью
Диапазон рабочих углов:	
– по азимуту, град	± 270
– по углу места, град	От 5 до 85 (до 90 с третьей осью)
Максимальный скорости наведения:	
– по азимуту, градус/с	20
– по углу места, градус/с (не менее)	10
Максимальный ошибки наведения:	
– по азимуту, угловые минуты	2
– по углу места, угловые минуты	4
Функционирование при максимальной скорости ветра, м/с	25 (обеспечивается РПУ)
Габариты (ШхВхГ), м	8х8х8 – определяется РПУ
Масса, кг	2300
Материал рефлектора	Углепластик, структура – стеклосоты
Радиопрозрачное укрытие (РПУ)	Используется
X диапазон	
Полоса принимаемых частот, ГГц	8,0-8,4
Поляризация	Правая и левая
Коэффициент усиления, дБ	47
Диапазон несущих частот, ГГц	8,035-8,38
Вид модуляции принимаемого сигнала	BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 16APSK
Скорость приема и регистрации, Мбит/с	До 600 (300 по одному каналу)
Объем памяти накопителя, Тбайт	8
Режим работы	Ручное наведение, программное наведение, режим автосопровождения по сигналу КА
L диапазон	
Полоса принимаемых частот, ГГц	1,6-1,7

Поляризация	Правая
Коэффициент усиления, дБ	27
Вид модуляции принимаемого сигнала	BPSK, QPSK, DBPSK, DQPSK
Скорость приема и регистрации, Мбит/с	0,256-2,56
Объем памяти накопителя, Тбайт	2
Интерфейс выходной информации	Ethernet 100/1000
Типы принимаемых КА	Ресурс, Метеор (L), Terra, Aqua, Aura, Spot, Envisat

Исходя, из приведенных данных, получим модели наземного сегмента:

- модель наземного центра приема данных;
- модель ПК.

Модель наземного центра приема данных, в данной работе, характеризуется следующими параметрами:

- географическое местоположение;
- количество ПК, расположенном в рассматриваемом центре.

Модель ПК, в свою очередь, имеет следующие параметры, необходимые для дальнейших расчетов:

- скорость приема данных;
- время подготовки ПК к сеансу приема (для учета наведения и расшифровки полученных данных);
- технологические перерывы в работе ПК (для возможности учета отказа оборудования или временных интервалов обслуживания);
- загруженность ПК.

Основываясь на приведенных характеристиках, имеется возможность задать совершенно любую наземную систему для работы с ОГ КА ДЗЗ.

Справедливости ради, стоит отметить, что ЕТРИС ДЗЗ является абсолютным аналогом других современных наземных сегментов космических систем, таких как EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System) от NASA (National Aeronautics and Space Administration) и INFEO (Information on Earth Observation) от ESA (European Space Agency) или их системы-преемницы

ECHO (Earth Observing System Clearinghouse) (NASA) и SSE (Service Support Environment) (ESA).

В отличие от зарубежных аналогов, ключевая особенность ЕТРИС ДЗЗ состоит в ее предназначении, а именно в создании и распространении данных ДЗЗ по полученным заявкам потребителей данной продукции. Заявки, получаемые ЕТРИС ДЗЗ или любой другой аналогичной системой распределенного приема и обработки данных, могут быть двух видов:

- на получение свежей информации на конкретный регион интереса;
- на получение данных из архива на конкретный регион интереса.

Получение данных из архива подразумевает поиск оператором системы подходящих маршрутов съемки или уже обработанных снимков для дальнейшей обработки/дообработки и выдаче их заказчику.

Получение свежей информации характеризуется тем, что для получения данных необходимо спланировать их съемку или многочисленную/периодическую съемку земной поверхности, а также их дальнейшую передачу и обработку, вплоть до выдачи потребителю.

Сама модель заявки может быть охарактеризована следующими минимально-необходимыми для настоящего исследования параметрами:

- заказчик (потребитель) данных;
- требуемый тип КА (при наличии такого требования от заказчика);
- требуемый тип ЦА (при наличии такого требования от заказчика);
- требуемое линейное разрешение (при отсутствии предыдущих двух параметров является ключевым параметром для автоматического подбора типа ЦА);
- приоритет заказчика (предполагается, что заказчики системы могут быть как государственные службы, так и гражданское население – подразумевающее под собой различный уровень изначальных приоритетов);

- приоритет региона интереса (зависит от задачи, представляемой к получаемым данным ДЗЗ). Например, важный фактор при обнаружении чрезвычайных ситуаций – срочность получения данных;

- временной интервал съемки;
- необходимость повторной съемки (а также ее периодичность);
- минимально допустимый угол Солнца (при наличии такого требования от заказчика, при его отсутствии – автоматически определяется минимально-допустимым углом Солнца для работы ЦА);

- максимально допустимый угол наклона от надира (при наличии такого требования от заказчика);

- максимально допустимый процент облачности над регионом (один из ключевых параметров при планировании работы ЦА);

- координаты региона интереса (регион интереса должен быть представлен в виде выпуклого многоугольника с не менее чем 3-мя вершинами).

Фактическая заявка дополняется параметрами для ее дальнейшей обработки оператором системы, при необходимости. Вышеперечисленные параметры являются минимально-необходимым набором для регистрации и учета заявки в системе с целью дальнейшего планирования в настоящей модели.

На текущем этапе создания ЕТРИС ДЗЗ выявлена объективная неготовность средств наземного комплекса приёма и обработки информации ДЗЗ к формированию периодически обновляемого высокоточного сплошного бесшовного покрытия всей территории Российской Федерации в условиях кратного роста числа космических аппаратов и объёмов поступающей информации [5, 23]. Данная ситуация обусловлена комплексом взаимосвязанных причин, среди которых следует выделить:

- неоптимальную структуру хранения данных;
- низкую пропускную способность и недостаточную производительность средств обеспечения доступа к данным;

- отсутствие оперативного («онлайн») доступа ко всему массиву архивных данных, что требует процедуры их предварительного восстановления из архива;
- обработка жёстко привязана к месту хранения, а также длительность процедуры восстановления;
- удалённые сегменты архива недоступны «прозрачно» и зависят от каналов связи;
- создание тематического продукта слабо автоматизировано;
- планирование потоков информации по составным частям ЕТРИС ДЗЗ не отвечает новым требованиям по масштабу и оперативности.

1.1.3 Информационные продукты ДЗЗ и заявки на съёмку

Рынок данных ДЗЗ имеет среднегодовой темп роста за период 2016–2025 гг. около 7,5%. Главными потребителями данных комической съёмки были и останутся в ближайшем десятилетии государственные структуры – органы обороны и безопасности, а также гражданские органы государственной власти национального, регионального и местного уровней. Продажи данных ДЗЗ в частном секторе составляли всего ~30% в 2012–2016 гг. [58, 59].

Дальнейшее развитие рынка ДЗЗ будет идти в направлении увеличения доли и объемов информационных продуктов высокоуровневой обработки изображений с включением больших объемов дополнительных данных, повышающих потребительскую стоимость. Новым направлением будущего десятилетия станет рост доли продуктов аналитики «Больших данных» в связи с резким увеличением объемов данных ДЗЗ и развитием прикладных технологических инструментов – методов машинного обучения, искусственного интеллекта и нейросетевых технологий.

Интересные результаты дает рассмотрение рынка данных ДЗЗ при сегментации его по пространственному разрешению и типам съемочных систем. В прогнозе компании NSR (Northern Sky Research) принято деление спутниковых снимков на четыре категории: сверхвысокое разрешение (СВР) — менее 0,5 м на

пиксель; высокое разрешение (ВР) — от 0,5 до 1 м на пиксель; среднее разрешение (СР) — от 1 до 5 м на пиксель; низкое разрешение (НР) — более 5 м на пиксель.

По оценкам NSR, основной объем продаж (>60%) приходится на сегмент оптических данных ВР (метрового и субметрового 0,5...1 м). Сегмент ВР является разумным компромиссом между высокой информативностью продуктов субметрового разрешения и сравнительно невысокой стоимостью по сравнению с продуктами сегмента СР, где допустимым пределом сегодня является разрешение до 30 см на пиксель, а цена может достигать до 50–70 долларов США за км². С учетом приведенных доводов, сегмент продаж данных ВР по прогнозам останется ведущим в ближайшие 10 лет.

Интересен тот факт, что второе место по объему (18%) занимают продажи оптических данных среднего разрешения (1...5 м на пиксель), которые все активнее используются в приложениях, связанных с аналитикой «Больших данных», и в агросервисах.

Сегмент продаж оптических продуктов СР пока не велик (около 7%) из-за высокой стоимости данных, но в дальнейшем будет расти. Доля продаж данных радиолокационных систем составляет около 15% рынка и в перспективе будет возрастать. Поскольку стоимость радарных снимков аналогичного пространственного разрешения в 2–5 раз выше оптических, их рынок на текущий момент гораздо меньше. Это связано со сложностью обработки и интерпретации данных РСА, а также с относительно низким предложением на рынке ДЗЗ.

Спутники с оптоэлектронной аппаратурой СР (GSD ~0,3...0,5 м) являются технологическими локомотивами отрасли ДЗЗ. Восемь ведущих держав индустрии ДЗЗ: США, Франция, Израиль, Китай, Индия, Корея, Россия и Канада разрабатывают КА с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) СР нового поколения. Подробнее рассмотрено в работе [59-69].

Коммерческая привлекательность сегмента ВР (~0,5...1 м) приводит к появлению большого числа космических систем на базе миниразмерных КА массой 100–300 кг. В 2018 г. компании и организации из 15 стран

эксплуатировали более 50 КА с ОЭА высокого разрешения. Самые многочисленные орбитальные группировки ВР созданы в США, Китае и Индии, среди них группировки КА SkySat и BlackSky (США), Jilin (Китай) и Cartosat-2 (Индия).

Ведущие компании-операторы систем ДЗЗ проводят политику горизонтальной и вертикальной консолидации, стремясь создать, с одной стороны, полную линейку спутников с ОЭА и РСА разного разрешения (от СВР до НР), с другой стороны, поглощая компании из смежных сегментов рынка бизнес-аналитики и обработки данных, создавая производственные цепочки глубокой переработки информации. В ином случае, операторы ДЗЗ начинают уступать растущий рынок ИТ компаниям, которые, закупая снимки у разных операторов, создают аналитические продукты и сервисы для конечных клиентов.

Основной тенденцией рынка продаж данных СР и НР является снижение стоимости - вплоть до обеспечения открытого доступа к данным государственных гражданских программ Landsat (США), Sentinel (ЕС), Resourcesat (Индия), CBERS (Бразилия и Китай), в том числе через облачные сервисы AWS и др.

Независимо от типа аппаратуры наблюдения заявки в систему поступают последовательно. Каждая поступающая в систему заявка подлежит обязательной регистрации с фиксацией даты и времени её поступления, а также присвоением уникального идентификационного номера.

При формировании заявки потребитель указывает набор регламентированных атрибутов, определяющих требования к целевому продукту:

- идентификационные и контактные данные заказчика, а также сведения о конечном потребителе и цели использования информации;

- пространственные параметры района (или районов) съёмки — в виде полигона с координатами вершин в системе WGS-84 (World Geodetic System 1984);

– технические параметры съёмки: тип платформы-носителя ЦА, требуемые спектральные диапазоны, интервал и периодичность съёмки, допустимые углы Солнца и угол визирования, максимально допустимая доля облачности над районом интереса;

– параметры продукта: приоритет районов (при наличии нескольких), радиометрическое разрешение, код уровня обработки, систему координат выходного изображения, максимальный размер файла и формат записи;

– логистические параметры — способ передачи конечного продукта.

Текущее состояние j -й заявки, находящейся на обслуживании, формализуется переменной c_j , дискретные значения которой отражают этап жизненного цикла заявки в системе:

- $c_j = 0$ — заявка зарегистрирована;
- $c_j = 1$ — циклограмма готова;
- $c_j = 2$ — циклограмма в БЗУ;
- $c_j = 3$ — снимок в БЗУ;
- $c_j = 4$ — снимок в ППИ;
- $c_j = 5$ — продукт в ППИ;
- $c_j = 6$ — продукт в архиве;
- $c_j = 7$ — продукт у потребителя.

Множество поступающих заявок разделяется на группы, имеющие разные приоритеты (0 – 5, где 0 – наиболее важные, а 5 – наименее важные).

Использование приоритетов, до недавнего времени, позволяло решать задачу планирования съёмок. Однако, увеличение количества заявок, интерпретаций их приоритетности и числа КА в ОГ приводят к следующему:

– недостаточно просто указывать приоритеты заявок. Как районы наблюдения, так и требования к условиям проведения съёмки начинают накладываться друг на друга, что приводит к необходимости изменения

методики свертывания их приоритетов, отличающейся от классической линейной свертки.

- в условиях кратного увеличения числа заявок на съемку возрастают требования к полосе пропускания каналов передачи информации с борта КА на Землю. Отсюда следует необходимость рассмотрения альтернативных каналов на основе ретрансляции сигнала, в том числе через другие КА ОГ.

- невозможно одновременно выполнить все заявки при ограниченном ресурсе КА. Отсюда следует необходимость введения дополнительного показателя, помимо оперативности, который увеличит эффект системы ДЗЗ как системы, основным назначением которой является создание информационного продукта.

В качестве такого показателя может выступать условная стоимость полученного системой ДЗЗ информационного продукта, на основании заявок потребителей за определенный интервал времени. Это значит, что целью системы ДЗЗ является не только выполнение заявок отдельных потребителей в минимальные сроки, но и повышение условного дохода самой системы, который складывается из условных стоимостей переданной потребителю информации.

1.1.4 Основные рабочие процессы

В настоящее время, классическая система ДЗЗ состоит из ОГ КА и НКИ. Схема работы такой классической системы в России и других странах мира состоит в следующем, рисунок 1.4: оператор КС ДЗЗ получает ряд заявок от потребителей с интересующими условиями и регионами съемки, исходя из полученных заявок, а также загруженности системы, оператор КС ДЗЗ производит планирование съемки и сброса данных, далее запланированное и сформированное задание отправляется на необходимый КА ДЗЗ с помощью схемы управления «Земля-борт», после чего КА ДЗЗ производит съемку района интереса и сброс на запланированный (обычно ближайший) пункт приема информации (ППИ), в дальнейшем оператор производит обработку данных и выдачу необходимой информации потребителю.

Вышеописанная схема взаимодействия классической системы ДЗЗ имеет очень важный недостаток оперативности в виде того, что связь с нужным КА ДЗЗ возможна только в периоде его нахождения в зоне радиовидимости (ЗРВ) НКИ. Несмотря на то, что НКИ для действующей российской системы ДЗЗ распределены по всей территории России, большую часть времени КА ДЗЗ находятся вне ЗРВ. К примеру, как рассматривается в работе [70], для низкоорбитальных спутников, с параметрами орбиты близкими к международной космической станции (МКС), продолжительность сеанса составляет всего 10-12 минут, после этого связь отсутствует на протяжении 80 минут.

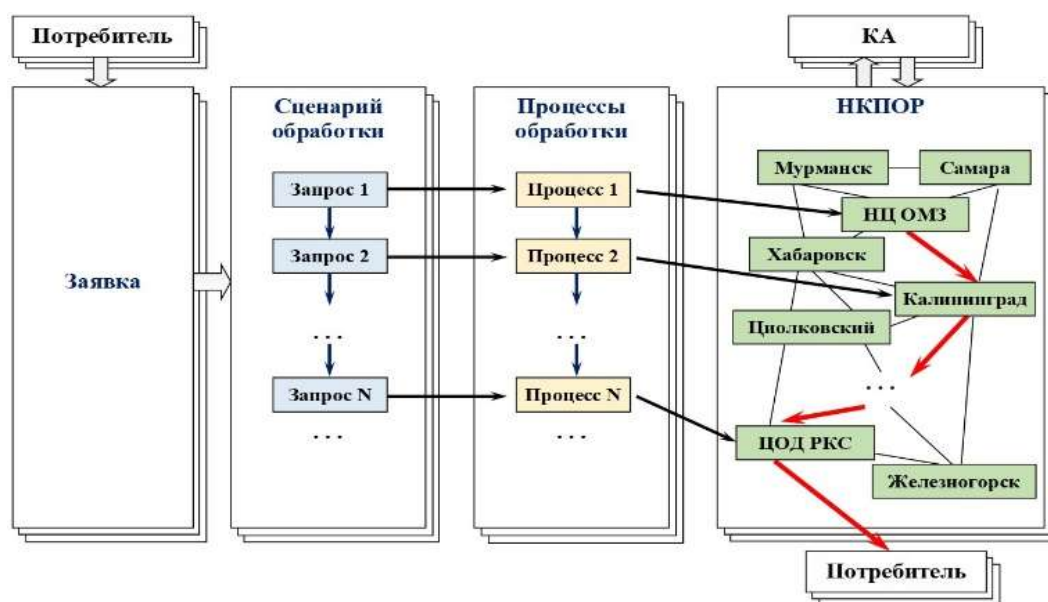


Рисунок 1.4 – Основные рабочие процессы

На входе системы используется следующая совокупность исходных данных:

1) сведения об узлах информационной системы — КА и ППИ, включающие:

- по орбитальной группировке: перечень и технические характеристики всех КА;
- по наземному комплексу приёма: перечень и характеристики ППИ, в том числе возможность хранения данных, поддерживаемый уровень обработки,

объём хранилища, тип выходной продукции и скорость передачи информации потребителям;

2) политика распределения вычислительных ресурсов — совокупность ограничений и приоритетов, регламентирующих процессы получения, обработки, хранения и выдачи информации потребителям;

3) перечень потребителей с указанием их географического расположения, приоритета и поданных заявок;

4) параметры каналов передачи информации между узлами системы: количество и пропускная способность каналов, а также перечень абонентов каждого канала;

5) временные и стоимостные характеристики операций — время выполнения и условная стоимость каждой операции в технологической цепочке.

Потребители направляют в систему заявки, отличающиеся индивидуальными требованиями и периодичностью поступления. Каждая поступившая заявка инициирует реакцию информационной системы, выражающуюся в формировании упорядоченной последовательности запросов на выполнение необходимых операций. Данная последовательность определяется соответствующим сценарием обработки, закреплённым за типом заявки. Каждому запросу, включённому в сценарий, сопоставляется один из типовых технологических процессов. При этом реализация каждого процесса возможна исключительно в заранее определённых узлах информационной системы, обладающих требуемыми функциональными и техническими возможностями.

Технологический процесс распределения потоков целевой информации в рамках функционирования КС ДЗЗ как единой ИС ориентирован на обслуживание заявок потребителей на готовый тематический продукт. Глубина обработки данных определяется требованиями, зафиксированными в заявке, и может варьироваться от предоставления снимков в различных спектральных диапазонах с базовой коррекцией до выполнения тематической обработки с последующим анализом результатов. Обслуживание каждой

заявки декомпозируется на последовательно выполняемые этапы (фазы), каждому из которых ставится в соответствие один из основных рабочих процессов:

- сбор заявок и планирование;
- передача и приём циклограмм;
- проведение съёмки и хранение данных на борту КА;
- передача и приём отснятых маршрутов;
- стандартная или тематическая обработка данных;
- архивация и доставка готового тематического продукта потребителю.

Основные рабочие процессы системы реализуются как взаимодействия между описанными объектами, рисунок 1.4. В ходе таких взаимодействий осуществляется обмен данными, а также преобразование свойств и/или состояний участвующих объектов. Важно отметить, что рабочие процессы, относящиеся к разным заявкам, не синхронизированы во времени: одноимённые процессы для различных заявок, как правило, не совпадают по срокам исполнения. Вследствие этого функционирование системы представляет собой совокупность множества рабочих процессов, реализуемых в последовательно-параллельном режиме, что обеспечивает гибкое распределение нагрузки и одновременную обработку разнородных запросов.

1.2 Подходы к решению задачи управления потоками целевой информации

В работе [23] предложен методологический подход к оптимизации распределения потоков ЦИ в КС ДЗЗ. Его суть заключается в сведении задачи к оптимизации последовательности выполнения технологических процессов обработки. Решение строится на совокупности взаимосвязанных математических моделей, каждая из которых описывает отдельный процесс в рамках заданных ограничений. На входе модель оперирует определённым объёмом информации (трафиком), преобразуя его в ходе процесса (с возможным увеличением или уменьшением объёма) и рассчитывая ключевые системные

показатели эффективности — время реализации процесса и его условную стоимость, рисунки 1.5 и 1.6. Независимыми переменными в моделях выступают системное время и объём информации (трафик) в системе.



Рисунок 1.5 – Модель процесса обработки информации (космический сегмент)

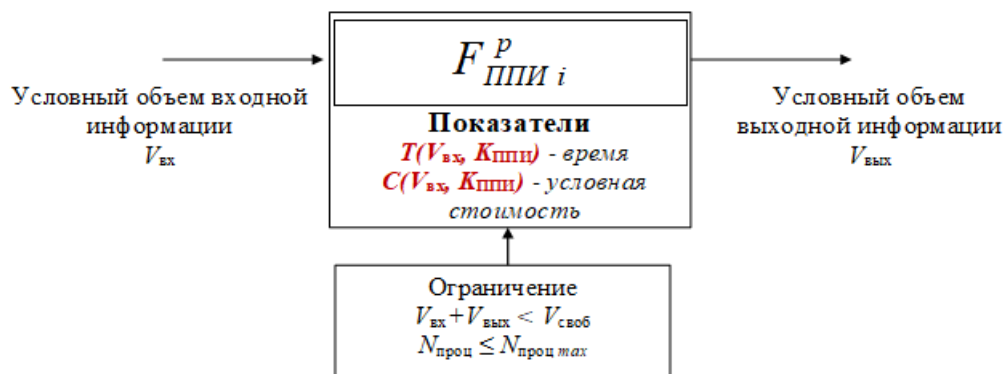


Рисунок 1.6 – Модель процесса обработки информации (наземный сегмент)

При наличии поступившей заявки и выделенного кластера КА множество всех возможных вариантов расчёта показателей эффективности её выполнения может быть представлено в виде направленного графа, рисунок 1.7. Каждая ветвь графа соответствует одному из допустимых сценариев реализации заявки, а вершины отражают промежуточные состояния системы или ключевые этапы обработки. Такая графовая модель позволяет формализовать перебор

альтернативных маршрутов исполнения и оценить их по целевым метрикам — времени, стоимости, загрузке ресурсов.

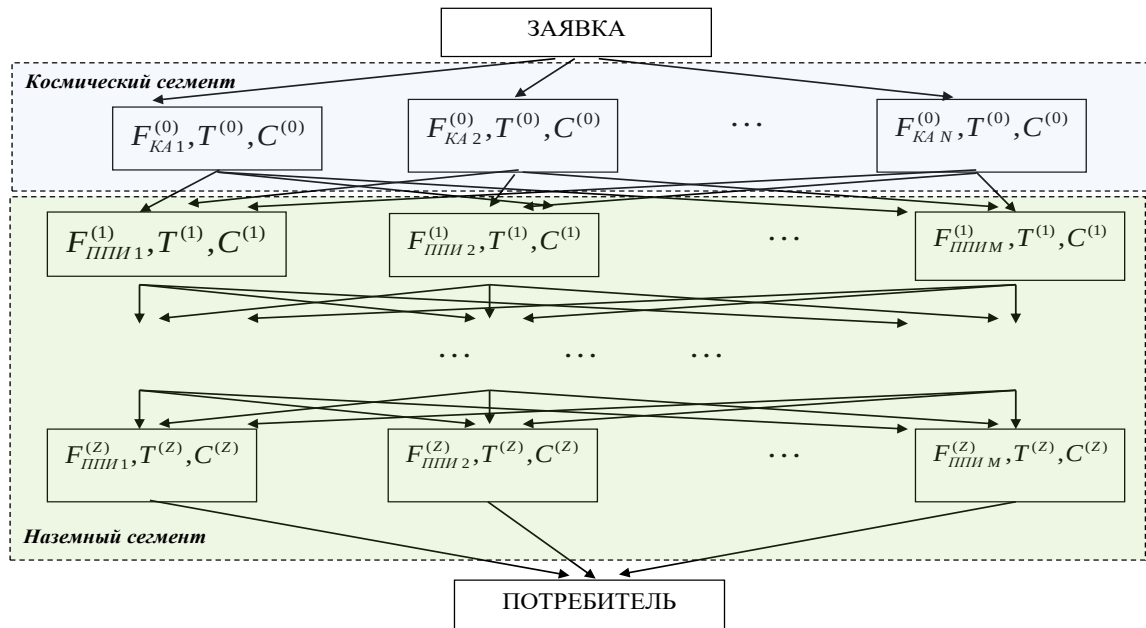


Рисунок 1.7 – Граф возможных вариантов выполнения заявки

В настоящее время в системах ДЗЗ наблюдается тенденция к существенному повышению нагрузки целевой обстановки, которое обусловлено кратным увеличением ОГ КА ДЗЗ с одновременным существенным увеличением количества конкурентных заявок и, как следствие, их площади. Если для наземного сегмента сложная объектовая обстановка обуславливает преимущественно необходимость масштабирования инфраструктуры, то в космическом сегменте она требует существенной доработки математических моделей и алгоритмов — прежде всего планирования сеансов съёмки и сброса ЦИ на наземные пункты. Это связано с рядом принципиальных ограничений существующих подходов:

1. отсутствие поддержки режима «сброс и съёмка одновременно», существующие модели не учитывают такую возможность;
2. низкая надёжность оптимизации при большой размерности, классические методы не гарантируют сходимость в нагруженных сценариях;

3. сложность формализации приоритезации, трудно корректно учесть пересечения районов съёмки, требования по облачности и приоритеты заявок;

4. необходимость дополнительных эвристических допущений в случае нагруженной обстановки для скорости расчётов:

- аппроксимация района интереса окружностью (или 2–3 окружностями);
- сокращение уровней приоритета с 5 до 3;
- сброс данных всегда на ближайший ППИ.

Такого рода допущения являются достаточно критичными при решении строгой оптимизационной задачи поскольку для большого числа КА ДЗЗ и нагруженной целевой обстановке:

- аппроксимация территории районов интересов окружностями потребует большой дополнительной «холостой» работы ЦА наблюдения с последующей загрузкой ППИ;
- при наложении нескольких районов съёмки, а также облачности, недостаточно дискретизации уровней приоритетности, здесь речь скорее должна идти о формировании уровня приоритетности в виде вещественного числа;
- учет облачности приводит к неоднородности приоритетности как внутри отдельно взятого района наблюдения, так и всего задания на съёмку в целом.

Таким образом, одним из направлений адаптации методологического подхода [23] к новым условиям применимости является пересмотр технологий планирования и передачи ЦИ в наземный сегмент (ретрансляции на ППИ), рисунок 1.8.

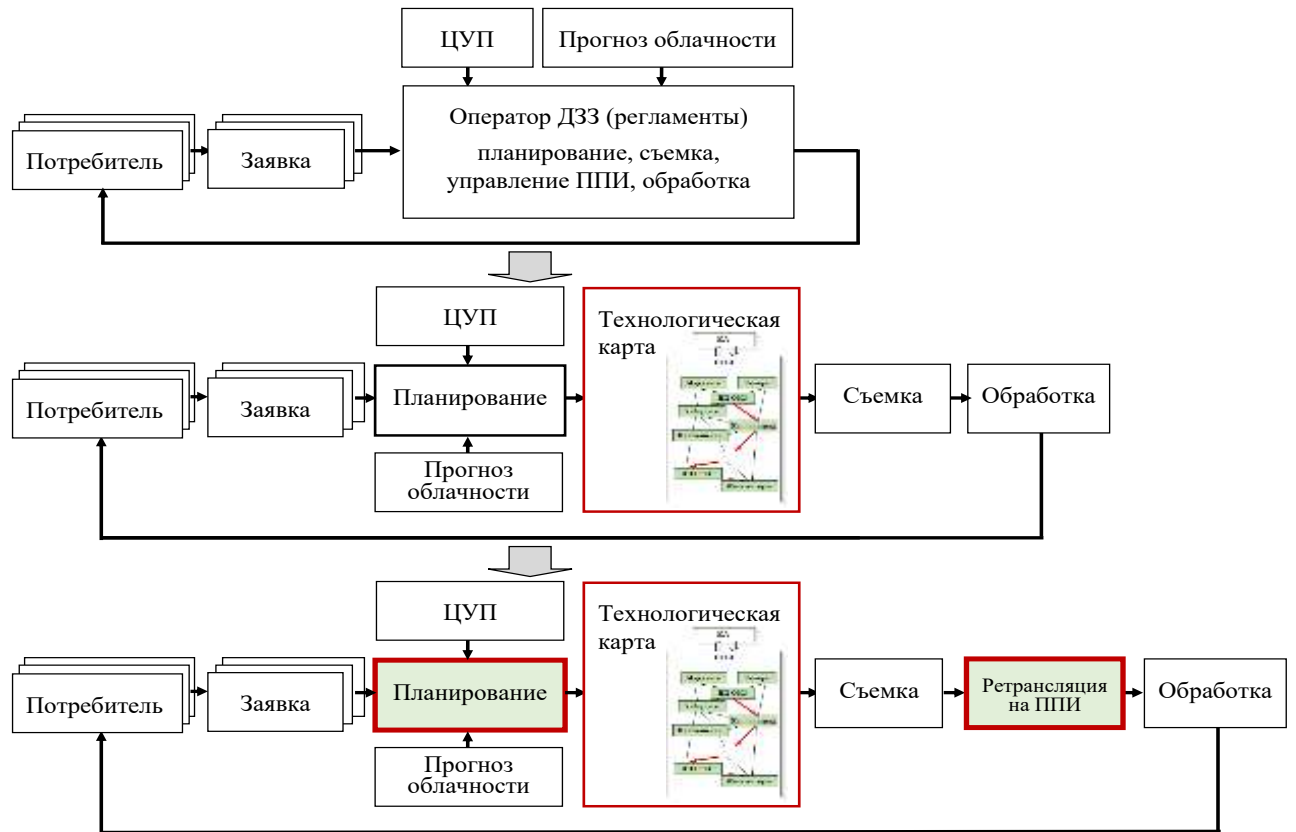


Рисунок 1.8 – Развитие методологического подхода

Если рассмотреть цели планирования наблюдений и ретрансляции сигнала в ракурсе предлагаемого методологического подхода в части их вклада в показатели эффективности, то очевидно, за счет более эффективного планирования наблюдений можно существенно повысить ценность получаемой информации и, как следствие, ее условной стоимости. При этом время, затрачиваемое на ее получение, практически не меняется. С другой стороны, эффективное планирование маршрутов ретрансляции сигнала может существенно снизить время получения информации наземным сегментом, оставаясь при этом инвариантной к ее стоимости. Это позволяет рассматривать подходы к решению задач планирования и ретрансляции независимо, интегрируя результаты решения в процедуру последовательной оптимизации, рисунок 1.9.

требуемой эффективности при масштабировании как инфраструктуры, так и алгоритмов планирования.

В настоящей работе предлагается новое научно-обоснованное техническое решение, имеющее большое значение для создания подобных систем и позволяющее сформировать методику, а также провести комплексное оценочное моделирование всей КС, как с использованием, так и отсутствием:

- новых механизмов формирования опорного плана съемки перспективных средств межспутникового взаимодействия с целью передачи данных;
- использования космического сегмента, как каждого узла системы в отдельности;
- использования наземного сегмента системы.

1.2.1 Планирование съемки

Тенденция к увеличению числа пользователей космической системы ДЗЗ приводит к кратному увеличению числа заявок и, как следствие, к увеличению площадей районов съемки. Это, в свою очередь, приводит к необходимости в задаче планирования сеансов наблюдений учитывать, как ценность получаемой информации, так и размерность возникающей оптимизационной задачи, решение которой должно быть получено в приемлемые сроки. Все это требует дальнейшего развития подходов к планированию съемок.

Одним из перспективных подходов для решения задачи планирования сеансов наблюдений при большом количестве КА ДЗЗ и нагруженной целевой обстановки, в работе [71] предлагается мультиагентный подход. В основе предлагаемого подхода лежит концепция сети потребностей и возможностей, в которой используются агенты потребностей (заявки) и агенты возможностей (ОГ КА ДЗЗ и НКИ). По заявлениям авторов концепции суть предлагаемого подхода состоит в поиске наилучшего решения для каждой заявки, с нарушением ограничений совместного использования возможных ресурсов и взаимных уступок агентов возможностей. Однако сам мультиагентный подход существует

более 30 лет, например в работе [72-73] указаны некоторые, значительные для решения задачи моделирования работы КС ДЗЗ, минусы. Основным минусом является критически высокая сложность разработки, что представляется как:

- каждый агент системы должен иметь четко описанную задачу и критерии работы, если при проектировании работы не учтены все нюансы работы – агенты начнут принимать некорректные решения, с конфликтами между собой;

- созданная архитектура мультиагентной сети имеет значительные проблемы масштабируемости, при существенном увеличении количества агентов потребностей или агентов возможностей – созданная архитектура не справится с моделированием;

- отсутствие централизованного управления в моделировании таких сложных систем, как КС ДЗЗ. Каждый агент системы стремится решить свою задачу как можно лучше, но предложенное решение может отрицательно сказываться на решении общей задачи КС ДЗЗ.

Кроме того, в работах [74-75] приведены подходы к планированию работы ОГ КА ДЗЗ при помощи классических методов оптимизации. Однако, в результате экспериментальной отработки проявилась нецелесообразность использования в качестве показателя эффективности линейной свертки приоритетов. Существенное увеличение числа районов, без дополнительных допущений, приводит к замедлению классических методов, таких как метод ветвей и границ, генетический алгоритм, метод случайных назначений и метода направленного перебора. Результаты проведенной экспериментальной отработки продемонстрировали, что уровень нагруженности объектовой обстановки, приближённый к реальным эксплуатационным условиям, существенно превышает расчётные возможности применяемых методов. В ряде тестовых сценариев зафиксировано отсутствие сходимости алгоритмов, что свидетельствует о недостаточной устойчивости существующих подходов при работе в высоконагруженных режимах.

Тем не менее, дробление районов съёмки (увеличение размерности задачи оптимизации) является объективно необходимым и, чем меньше площади получаемых районов, тем больше возможностей мы имеем в части учета наложений, приоритезации и совместной работы аппаратуры наблюдения. С этой точки зрения имеет смысл перейти от указанных выше алгоритмов к более простым, но прогнозируемым по объему данных и вычислительной реализуемости алгоритмам.

Таким образом, можно сформулировать следующие ключевые предложения в развитие методики расчета целевых показателей ОГ КА в части управления линией визирования:

1) переход от полигонального представления районов с назначенным приоритетом к геопривязанному растровому с назначением каждой его точке своего приоритета. Задание на расчёт плана съёмки в рассматриваемом случае предполагает формирование единого растрового представления зоны интереса путём объединения отдельных растровых районов с учётом их приоритезации. Процедура объединения может быть реализована посредством стандартных механизмов скаляризации — как в автоматизированном режиме, так и с привлечением экспертной оценки. Альтернативным подходом выступает применение механизмов неформального анализа, позволяющих учитывать слабо формализуемые факторы при агрегировании районов.;

2) декомпозиция задачи на три взаимосвязанные подзадачи:

- подготовка исходных данных - формирование информационной базы для последующих расчётов: параметры орбит КА, характеристики целевой аппаратуры, координаты районов съёмки, ограничения и приоритеты заявок;

- расчёт моментов ключевых событий, определение временных границ: вход/выход КА в зоны радиовидимости наземных средств; вход/выход в зоны, допустимые по условиям освещённости для проведения съёмки;

- иные аналогичные события, определяющие временные окна доступности;

– планирование съёмки группой КА, оптимизация плана съёмки на заданном интервале с обязательным учётом способов ретрансляции информации на ППИ в составе оптимизационного контура.

Каждая подзадача использует результаты предыдущей: исходные данные (ИД) формируют базу для расчёта событий, а моменты событий определяют допустимые временные окна для оптимизации плана.

3) ключевым направлением работ выступает разработка стабильных оптимизационных процедур, учитывающих необходимость снижения размерности вектора независимых параметров, используемого в этих процедурах, уменьшение размерности позволяет повысить вычислительную устойчивость алгоритмов и сократить время поиска допустимого решения при сохранении требуемой точности целевых показателей;

4) в условиях нагруженной объектовой обстановки в качестве целевого показателя эффективности целесообразно использовать условную стоимость готового тематического продукта, при этом обязательным условием выступает ограничение на интервал планирования, которое задаёт временные рамки реализации задач и определяет допустимую область поиска оптимального решения.

Под условной стоимостью готового тематического продукта будем понимать совокупность условных стоимостей всех отснятых элементарных районов одинаковой размерности (условно будем называть «точек») на поверхности Земли на интервале планирования. При этом условная стоимость каждой точки должна включать в себя:

- приоритетность точки в рамках поданной заявки;
- наложение районов съёмок;
- облачность в районах съёмок;
- имеющийся, возможно неформальный, опыт планирования.

Иными словами, условная стоимость должна с одной стороны являться сверткой приоритетности, с учетом пересечения районов съёмки и текущих

метеопрогнозов, а с другой – учитывать предыдущий опыт, то есть быть обучаемой.

Решение задачи оптимизации целевого функционирования ОГ КА ДЗЗ в её полной постановке возможно исключительно при условии разработки и применения специализированных методов принятия решений. В качестве основы выступают методы комплексной многокритериальной оптимизации, которые должны быть адаптированы к специфическим условиям эксплуатации ОГ КА ДЗЗ — включая высокую размерность задачи, жёсткие временные окна, разнородные ограничения и противоречивые критерии эффективности.

В конечном итоге, в рамках развития существующего подхода, для расчета стоимости готового тематического продукта в качестве ИД необходимо сформировать матрицу, в ячейке которой указана условная стоимость соответствующего ей элементарного района наблюдения. Если говорить в терминах разработанных ранее оптимизационных алгоритмов вся поверхность разбивается на одинаковые окружности. При рациональном выборе размера района это позволяет:

- за счет увеличения размерности матрицы точнее аппроксимировать геометрически сложные районы наблюдения;
- без дополнительных допущений учитывать при планировании точечные объекты;
- за счет регулирования стоимости учитывать текущую метеобстановку.

Размерность матрицы должна выбираться с учетом характеристик ЦА, с одной стороны, и возможностей вычислительной системы с другой. Так, например, для ЦА КА типа «Канопус» достаточно установить диаметр окружности порядка 4 км. В этом случае размер матрицы стоимости составит 5009 строк X 10018 столбцов.

Матрица, сформированная на основе всех заявок, их приоритетов и результатов метеопрогноза по сути является одной обобщенной заявкой с

указанием стоимости каждого ее элемента (пиксела), рисунок 1.11. Это позволяет перейти от задачи с неопределенным числом входных данных к задаче с фиксированной и прогнозируемой размерностью.

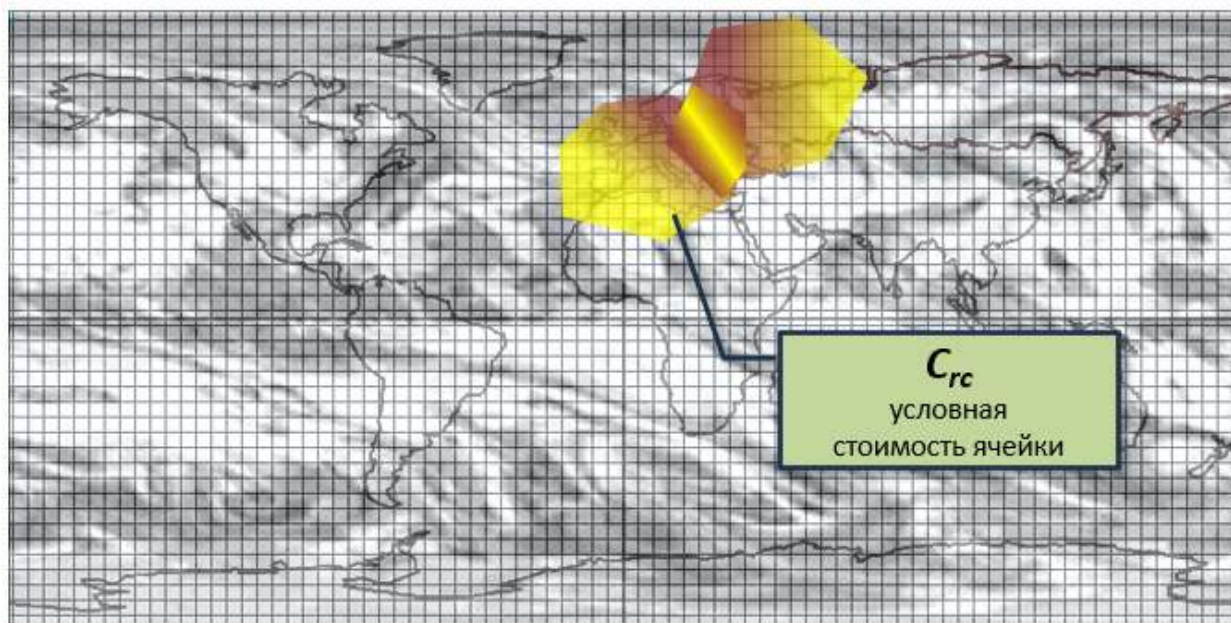


Рисунок 1.11 – Формирование стоимости готового тематического продукта на основе матрицы стоимости

Таким образом, задача расчета целевых показателей ОГ КА ДЗЗ в части управления линией визирования (ЛВ) со значительной площадью участков интереса на заданном интервале времени разделяется на две подзадачи:

1) задача подготовки исходных данных в виде совокупности характеристик КА, ЦА и матрицы стоимости (обобщенной заявки);

2) решение задачи оптимизации программ изменения крена совокупности КА ОГ с целью максимизации условной стоимости тематического продукта, как совокупности условных стоимостей всех отснятых точек на заданном интервале планирования при наличии классических ограничений, включающих в себя ограничения по:

- углу крена;
- угловой скорости перенацеливания по крену;
- максимальному объему БЗУ;
- интервалам времени и скорости ретрансляции на ППИ;

- ширине диаграммы направленности;
- минимальному межмаршрутному интервалу;
- скорость записи в БЗУ при съемке;
- угловому полю зрения;
- минимальному времени маршрута;
- максимальному времени маршрута;
- максимальному времени работы на витке;
- максимальной длительности работы за сутки;
- минимальному углу Солнца при съемке;
- максимальному углу Солнца при съемке.

Основой для решения задачи подготовки исходных данных является определение способов преодоления неопределенностей при формировании матрицы стоимости, которые условно можно разбить на две группы.

Первая группа методов базируется на введении дополнительных гипотез, позволяющих трансформировать задачу многокритериальной оптимизации в задачу однокритериальной оптимизации. Этот прием иногда называют скаляризацией или свертыванием критериев. Известно значительное число способов скаляризации, подробно описанных в литературе [23, 76–93]. Ключевым недостатком данных подходов выступает статичный характер заложенной в них экспертной оценки: она формируется априори и не предусматривает механизмов обратной связи по итогам практического применения. Вследствие этого отсутствует возможность оперативного внесения корректировок в процесс планирования при изменении условий или выявлении отклонений от ожидаемых результатов, что снижает адаптивность получаемых решений в динамической среде.

Вторая группа способов предполагает анализ множества исходных вариантов решений с использованием неформального анализа, рисунок 1.12. При этом скаляризация является одним из способов такого анализа. В настоящее время перспективным способом проведения такого неформального анализа

является использование специализированной искусственной нейронной сети для формирования матрицы стоимости, который помимо привлечения экспертов, предполагает обратную связь (обучение) по результатам функционирования системы [77, 94].

По сути, их задачей является анализ и обобщение информации о заявках, их приоритетности с учетом возможных пересечений районов и метеопрогнозов, а также формирование матрицы стоимости (обобщенной заявки).

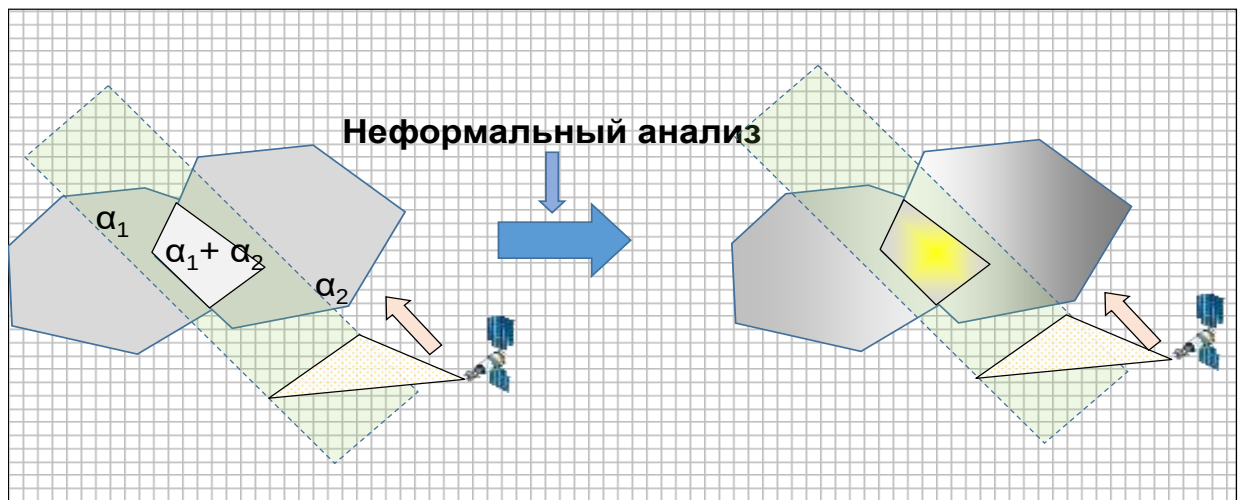


Рисунок 1.12 – Подходы к формированию матрицы стоимости [77]

Таким образом, для доработки математических моделей и алгоритмов планирования съемки по заявкам на заданном интервале времени необходимо учесть следующее:

- в качестве исходных данных мы имеем подготовленную в соответствии с принципами, представленными выше или любым иным способом матрицу условных стоимостей районов наблюдения;
- в качестве критерия, по которому необходимо проводить оптимизацию программ изменения крена совокупности КА ОГ необходимо принять совокупную стоимость попавших в поле зрения ЦА наблюдения районов с учетом принятых ограничений.

В нашем случае, когда имеется большое число КА ОГ и нагруженная объектовая обстановка, появляется задача многокритериальной оптимизации,

как задача одновременной минимизации некоторой совокупности критериев $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ как стоимости попавших в поле зрения аппаратуры наблюдения каждого КА ОГ районов с учетом соответствующих им ограничений. Следует сразу заметить, что строго математически задача в такой постановке смысла не имеет, так как минимумы отдельных критериев оптимальности в общем случае достигаются при разных значениях вектора x .

Вместе с тем математические методы принятия решений совместно с методами оптимизации могут помочь принять правильное (разумное) решение и в этом случае.

Одним из способов формирования контрольных значений для исходных критериев оптимальности f_i^* может служить получение решений следующих однокритериальных задач (1.1).

$$x_*^i = \arg \min_x f_i(x), \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.1)$$

В этом случае совокупность величин $f_i^* = \min_x f_i(x) = f_i(x_*^i)$ в пространстве исходных критериев определяет решение, которое можно назвать «абсолютным» минимумом. Эта точка достижима лишь в случае, когда все решения x_*^i совпадают. В остальных же случаях можно говорить лишь о близости к этой точке. Если теперь ввести в рассмотрение некоторую скалярную функцию, характеризующую степень этой близости, то ее можно использовать в качестве нового скалярного критерия оптимальности. В простейшем случае такой функцией может быть квадратичная форма вида (1.2).

$$f(x) = \sum_{i,j=1}^m (f_i(x) - f_i^*) \lambda_{ij} (f_j(x) - f_j^*), \quad (1.2)$$

где λ_{ij} - элементы некоторой положительно-определенной матрицы.

В нашем случае, в качестве «абсолютного» минимума может быть принята программа условно «идеального» крена ЛВ, которой соответствует непрерывное изменение угла крена ЛВ, обеспечивающее получение максимальной условной стоимости при отсутствии ограничений на условия съемки.

Особенностью данной задачи является взаимное влияние работы одного КА ДЗЗ на работу другого. При этом надо отметить, что в контексте

предлагаемой методики план съемки должен учитывать не только максимизацию условной стоимости продукта, но и возможный способ его ретрансляции целевой информации на ППИ.

Необходимость совместного планирования работы всей орбитальной группировки КА обуславливает постановку единой оптимизационной задачи. Ключевой вычислительной трудностью при её решении выступает так называемое «проклятие размерности»: на каждом шаге оптимизации требуется хранить информацию о функции будущей эволюции состояния всей системы КА. Реализация такого подхода сопряжена с колоссальными требованиями к объёму памяти и оказывается практически невыполнимой даже на современных вычислительных платформах из-за экспоненциального роста размерности пространства состояний с увеличением числа аппаратов в группировке. В связи с этим необходимо прибегать к различным приближенным методам, основанным на допущениях, к которым предлагается отнести следующие:

- совокупная стоимость тематического продукта на всем интервале планирования является суммой совокупных стоимостей на непересекающихся подынтервалах;

- совокупная стоимость на каждом подынтервале определяется как упорядоченная сумма стоимости попавших в поле зрения ЦА наблюдения КА ДЗЗ районов матрицы стоимости при условии, что они не наблюдались другими КА ДЗЗ;

- на каждом подынтервале программа изменения угла ЛВ КА ДЗЗ с учетом возможного изменения угла крена каждого КА ДЗЗ формируется на основе программы «идеального» крена и ограничений на съемку;

- задачи планирования и ретрансляции на подынтервале могут быть решены раздельно.

Такой подход позволяет:

- осуществить переход от постановки с неопределённой размерностью, обусловленной совокупностью формализуемых и неформализуемых факторов, к

задаче с прогнозируемой размерностью, что позволит заранее детерминировать вычислительную сложность и требования к ресурсам;

- за счёт декомпозиции исходной задачи существенно сократить размерность подзадач, решаемых на отдельных этапах планирования, снизить риск расходимости оптимизационных процедур при высокой нагрузке;

- при нагруженной объектовой обстановке гарантировано обеспечить нахождение рационального решения;

- гарантировано обеспечить разрешение неопределенностей, связанных с приоритезацией и учетом облачности в районах съемки.

Чтобы дополнить математические модели и алгоритмы для оценки возможности выполнения заявки со значительной площадью участков интереса на заданном интервале времени с учетом этих допущений необходимо:

- 1) определить алгоритм расчета программы «идеального» крена ЛВ на заданном подынтервале планирования;

- 2) определить алгоритм формирования подынтервалов планирования;

- 3) определить алгоритм упорядочивания КА ДЗЗ в расчете совокупной стоимости;

- 4) определить алгоритм формирования изменения угла крена ЛВ каждого КА ДЗЗ на подынтервале планирования на основе программы «идеального» крена ЛВ

- 5) выходными данными доработанных моделей и алгоритмов являются:

- план изменения угла крена ЛВ КА ДЗЗ в виде графической и текстовой информации;

- количественные параметры выполнения заявки в виде:

- а) абсолютных показателей по площади наблюдаемых районов и их совокупной стоимости;

- б) доли площади наблюдаемых районов по отношению к их общей площади;

в) доли совокупной стоимости наблюдаемых районов по отношению к их общей совокупной стоимости.

1.2.2 Ретрансляция целевой информации

Целевое функционирование космического сегмента ДЗЗ в части ретрансляции ЦИ состоит в использовании широкополосной связи посредством установления и удержания каналов связи через сеть КА ДЗЗ и связи. Принцип организации каналов межспутниковой связи состоит в следующем: в момент связи радиосигнал от абонентского терминала передается на бортовое АФУ ближайшего КА, в зоне обслуживания которого он находится, обрабатывается, ретранслируется через сеть КА и затем передается на терминал адресата.

Одним из путей снижения времени, необходимого для сброса целевой информации на Землю видится использование геостационарных спутников-ретрансляторов (ГСР). Система передачи данных по схеме КА→ГСР→ППИ, на первый взгляд, позволяет решить две ключевые проблемы: обеспечить требуемый уровень оперативности доставки информации и предотвратить переполнение БЗУ КА за счёт своевременного сброса накопленных данных. Однако она экономически нецелесообразна, поскольку требует огромных экономических вливаний для ее создания и эксплуатации [95].

С другой стороны, в классическом варианте КА→ППИ помимо задержек, связанных с географией ЗРВ, при больших объемах возникает проблема снижения достоверности в данных ДЗЗ и, как следствие, к снижению условной стоимости информации могут привести различные помехи, низкий уровень энергетики в радиоканалах передачи, отсутствие помехоустойчивого кодирования данных. Требования к достоверности данных ДЗЗ образуются в ходе обработки полученной информации и обычно передача данных ДЗЗ считается эффективной, если вероятность ошибки не превышает 10^{-6} . Полученный и экспериментально опробованный уровень качества информации должен быть больше, чем 10^{-8} , данное значение получено при эксплуатации на объектах аппаратуры приема и демодуляции АО «НИИ ТП» информации от ДЗЗ

при работе с КА типа «Ресурс-ДК», Terra, Aqua и др. [96]. Особенно большие требования к достоверности данных предъявляются к сжатой информации, как, например, к данным с КА типа «Ресурс-П». При использовании средств сжатия данных, в особенности процедур сжатия изображений, передача которых является основной информационной составляющей в потоке данных канала передачи системах ДЗЗ из космоса, достоверность восстановления данных для последующей семантической обработки должна быть существенно более высокой. Естественно, эта достоверность в значительной мере зависит от используемой технологии сжатия и может быть оценена величиной вероятности ошибки $\sim 10^{-7}$ - 10^{-8} . К наиболее эффективному методу обеспечения высокого уровня достоверности относится многопороговое помехоустойчивое кодирование информации.

Несмотря на то, что в настоящее время для решения проблемы с хранением большого количества данных в БЗУ КА используются технологии компрессии (сжатия) данных (например, на КА типа «Ресурс-П» коэффициент сжатия данных может составлять $k_{сж}=2.5$) предложенное решение не может позволить полностью забыть о данной проблеме, что подтверждает необходимость создания новых технологий, связанных с передачей данных ДЗЗ с КА в наземный сегмент.

В качестве решения рассмотренных выше проблем функционирования КС ДЗЗ предлагается рассмотреть технологию функционирования КС ДЗЗ с модернизированными АФУ на каждом КА ДЗЗ, что позволит ретранслировать данные с помощью любого КА ДЗЗ системы. Это позволит за счет более оперативного решения задачи передачи данных уменьшить влияние различных условий на итоговую достоверность полученной информации ДЗЗ, что, в свою очередь:

- обеспечит возможность для более оперативного решения задачи передачи данных и уменьшит время между съемкой и сбросом результатов на ППИ

– снизит влияние различных условий на итоговую достоверность полученной информации ДЗЗ, повысив ее условную стоимость.

Существующая технология передачи данных между КА ДЗЗ и ППИ, а также между ППИ с использованием спутника-ретранслятора, обладает рядом существенных ограничений. К числу наиболее критичных относятся: невозможность обеспечения оперативного приёма данных в требуемые моменты времени; необходимость длительного хранения значительных объёмов информации в БЗУ КА ДЗЗ, что повышает риски переполнения памяти и потери данных; а также снижение достоверности информации на выходе тракта ВРЛ, количественно выражаемое средней вероятностью ошибки на бит. Указанные факторы ограничивают эффективность применения схемы ретрансляции в условиях жёстких временных требований и высокой интенсивности информационного обмена.

Необходимо отметить, что для решения проблем передачи сверхбольших объёмов данных проводятся многочисленные исследования, например в работах [97, 98] предлагается использование лазерных линий связи между КА, позволяющее обеспечивать передачу сверхбольших информационных потоков с пропускной способностью более 1 Гб/с.

Помимо исследований на данную тематику проводились и проводятся по настоящее время различные эксперименты. Например, эксперимент с системой OPALS – Optical Payload for Lasercomm Science [99]. Или проведенный в 2001 г. эксперимент SILEX (Semiconductor Intersatellite Link EXperiment), в рамках которого с КА SPOT-4, расположенного на низкой околоземной орбите (832 км) была передана информация на КА ARTEMIS, в свою очередь, расположенный на геостационарной орбите (31000 км). В итоге скорость передачи данных достигла 2 Мб/с [100]. При этом, в ходе проведения эксперимента смогли осуществить параллельную передачу данных на наземный пункт приема, с достижением скорости до 50 Мб/с.

Отдельно отметим систему EDRS – European Data Relay System. Проект разрабатывается европейским космическим агентством и представляет собой ОГ

из КА, расположенных на геостационарной орбите, позволяющие передавать информационные потоки между различными низкоорбитальными КА, наземными станциями и пр. В данной системе в качестве FAE для передачи данных используется технология LCT – Laser Communication Terminal [101]. Исходя из представленных данных разработчиков EDRS скорость передачи данных терминала LCT в радиоканале достигает 600 Мб/с, а оптический канал позволяет достичь 1.30 Гб/с с вероятностью ошибки на бит менее чем 10^{-4} [102]. Результаты эксперимента опубликованы в [103], после окончания испытаний EDRS планируют использовать для распределения информационных потоков с ретрансляцией данных группировки TerraSAR, а также Copernicus и Sentinel.

1.3 Анализ, формирование частных показателей эффективности и постановка частных задач распределения целевой информации космического сегмента КС ДЗЗ

Под частным показателем эффективности будем понимать количественные характеристики требований к эффективности подсистемы, служащие для выбора наилучшей альтернативы из всех пригодных [23]. Такими показателями могут быть производительность, оперативность и т.п. При этом, особую роль играют показатели, оценивающие затраты ресурсов.

Создание и эксплуатация любой подсистемы для каждой из альтернатив достижения цели подразумевает как затраты определенных ресурсов, так и их восполнение, которые чаще всего оцениваются показателем условной стоимости создания и эксплуатации подсистемы.

Выборе частного показателя должен:

- обеспечить оценку выполнения соответствующего требования, предъявляемого к подсистеме;
- быть чувствительным к анализируемым вариантам подсистемы, в частности, к выбираемым параметрам;

– быть достаточно простым и наглядным, иметь ясный физический смысл, чтобы у лица, принимающего решение, не возникало затруднений при физической интерпретации результатов исследования.

Под критерием предпочтения понимается формализованное правило, позволяющее на основании значений частных показателей (качества, эффективности, стоимости) обоснованно выделить предпочтительный вариант системы из множества альтернатив. Например, в качестве целевого критерия может выступать требование минимизации стоимости системы при условии, что показатели качества и эффективности не опускаются ниже заданных пороговых значений. Дополнительные условия при этом могут трактоваться либо как составная часть критерия, либо как жёсткие ограничения на допустимую область решений. Такая декомпозиция упрощает построение критерия: она позволяет чётко разделить показатели на целевые (оптимизируемые) и контролируемые (ограничиваемые), тем самым структурируя задачу выбора и снижая риск противоречивых требований.

При ограниченном составе подсистемы, включающей исключительно компоненты космического сегмента, применение процедуры объективного свёртывания показателей позволяет редуцировать многомерную оценку эффективности к двум ключевым частным критериям. Таковыми выступают оперативность ретрансляции целевой информации в наземный сегмент (интерпретируемая как временной показатель) и условная стоимость передачи данных. Данные показатели комплексно отражают целевое функционирование системы в заданных структурных рамках и пригодны для последующей формализации в виде оптимизационной задачи с двумя критериями.

Оперативность ретрансляции сигнала детерминируется совокупностью взаимосвязанных факторов, к числу которых относятся: фундаментальные физические принципы, лежащие в основе организации системы ретрансляции (включая характеристики радиоканалов, уровни сигналов и помех, методы модуляции и кодирования); орбитальное построение ОГ КА ДЗЗ, определяющее геометрию радиовидимости, длительность сеансов связи и динамику

относительного положения аппаратов; а также формат задействования функциональных дополнений, в частности, использование существующих и перспективных КС связи, расширяющих возможности маршрутизации и резервирования каналов передачи данных.

Условная стоимость целевой информации является функцией ряда детерминирующих факторов. К ним относятся: приоритетность заявок потребителей, определяющая весовые коэффициенты распределения ресурсов; вероятность дублирования или пространственного наложения районов съёмки, приводящая к избыточности съёмочных операций и росту удельных затрат; а также требования к качеству съёмки, которые, в свою очередь, выступают производной от технических характеристик ЦА и прогнозных метеоусловий, влияющих на вероятность успешного получения пригодных к использованию данных. Комплексный учёт этих факторов необходим для построения адекватной модели условной стоимости и оптимизации распределения съёмочного ресурса.

Анализ характеристик рассмотренных показателей демонстрирует их зависимость от ключевых системных факторов: орбитального построения КС наблюдения, технических параметров бортовой ЦА КА, а также текущей метеообстановки. Совокупность этих показателей служит интегральной мерой степени достижения целевых задач КС ДЗЗ. С позиции системы это максимизация условного дохода, формируемого за счёт рационального использования орбитально-аппаратных ресурсов и удовлетворения потребительского спроса. С позиции потребителя — обеспечение поставки информации, соответствующей заданным требованиям по спектральному разрешению, периодичности наблюдений и оперативности передачи данных [18].

Следует подчеркнуть взаимозависимость предложенных частных показателей эффективности. Данная зависимость опосредована объёмом целевой информации, формируемой и передаваемой в рамках функционирования подсистем планирования и ретрансляции. Изменение

параметров одной подсистемы (например, плотности планирования заявок или пропускной способности тракта ретрансляции) неизбежно отражается на значениях других показателей — таких как оперативность доставки, условная стоимость передачи или степень загрузки бортовых запоминающих устройств. Учёт этой взаимосвязи необходим при построении интегрированной модели оценки эффективности и при разработке согласованных алгоритмов управления ресурсами.

Перейдем к формализации частных показателей эффективности целевого функционирования космического сегмента КС наблюдения.

1.3.1 Частные показатели эффективности и постановка задачи планирования съемки

Эффективность целевого функционирования КС ДЗЗ на интервале планирования определяется совокупной ценностью информации, полученной в результате съемки земных объектов, которые могут быть «точечными» (укладывающимися в кадр целиком) или площадными, имеющими форму произвольных многоугольников. Если потребители в заявках на съемку задают требуемый тип съемочной ЦА, то считается, что при разработке плана целевого применения ОГ необходимость в решении оптимизационной задачи возникает только при распределении операций съемки/сброса между КА одного типа.

Под опорным планом съемки целевой информации будем считать программу изменения угла крена ЛВ с учетом накладываемых ограничений как со стороны ЦА, так и со стороны требований к условиям проведения съемки (освещенность, угол Солнца и др.)

Опорные планы съемки целевой информации строятся отдельно для каждой подгруппы однотипных КА с использованием алгоритмов решения оптимизационных задач. Считается, что выполнение каждым КА операций съемки из опорного плана происходит независимо от других КА, входящих в состав ОГ.

Со стороны потребителя логично формировать заявку с указанием ее важности (приоритета). Будем считать, что чем заявка важнее, тем выше ее условная стоимость. В силу пространственной протяженности районов наблюдения выполнение заявки происходит не одномоментно, а на интервале планирования возможно неполное её выполнение. Если разделить район наблюдения на элементарные районы одинаковой размерности и присвоить каждому району условную стоимость, то совокупность снятых на интервале планирования районов образует условную стоимость готового тематического продукта, которую надо максимизировать.

Таким образом в качестве частного показателя эффективности в задаче распределения целевой информации космического сегмента КС ДЗЗ в части оптимизации планирования съемки можно принять сумму всех условных стоимостей наблюдаемых элементарных районов при ограничениях на:

- условия работы ЦА;
- внешние условия наблюдения;
- облачность в районах съемок.

При формировании условной стоимости элементарного района необходимо учитывать:

- приоритетность точки в рамках поданной заявки;
- наложение районов съемок;
- имеющийся, возможно неформальный, опыт планирования.

Условная стоимость съемки одного элементарного района определяется величиной (1.3).

$$J_{ij} = C_{ij} \left(1 - \frac{|Q_{ij}|}{Q_{max}} \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1.3)$$

где C_{ij} – условная стоимость элементарного района (i, j) (рисунок 1.13), второй множитель – коэффициент качества изображения, учитывающий особенности работы ЦА, характеризующиеся снижением качества снимков районов, удаленных от линии надира, и достигающий наибольшего значения при съемке в надир и наименьшего значения – при съемке под углом Q_{max} ; n – число

разбиений интервала $[-180^\circ, +180^\circ]$ по долготе, m – число разбиений интервала $[-90^\circ, +90^\circ]$ по широте.

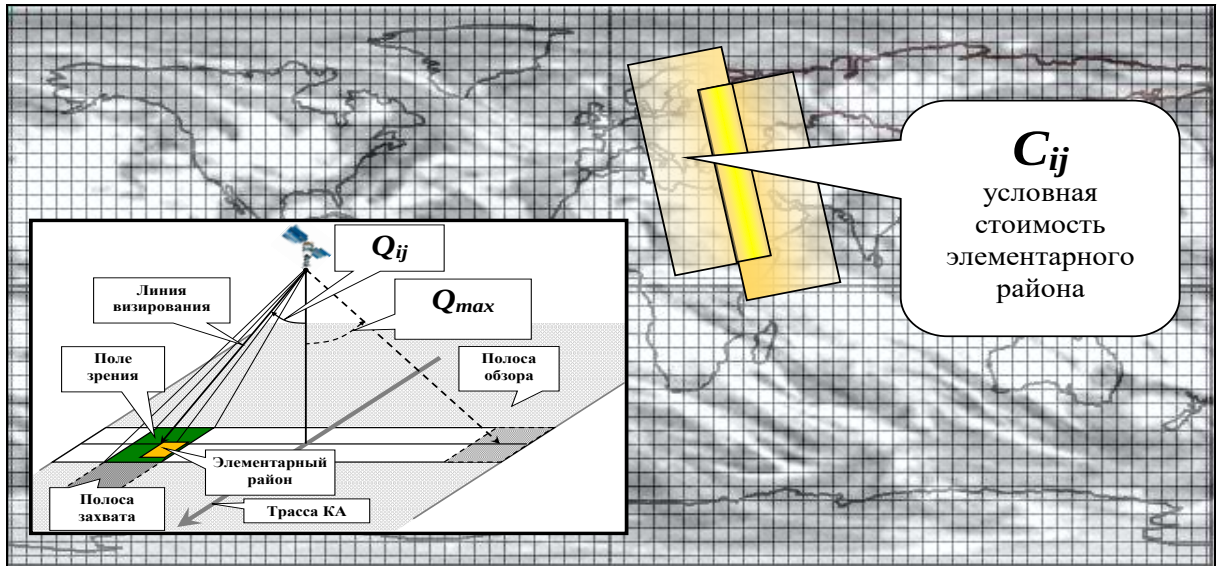


Рисунок 1.13 – Составляющие информационного эффекта [77]

Критерий, характеризующий ценность отснятой информации -м КА ОГ на интервале $[t_0, T]$, представляет собой линейную аддитивную функцию (1.4).

$$J_k(u_k, \theta_k(u_k)) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M J_{ij}(u_k, \theta_k(u_k)), \quad (1.4)$$

Тогда ценность отснятой информации всеми КА ОГ на интервале планирования $[t_0, T]$ представляет собой совокупность зависимых друг от друга частных критериев (1.5).

$$J(u) = J(u, \theta(u)) = \{J_k(u_k, \theta_k(u_k), \Pi_k^*(u_k)), k = \overline{1, K}\}, \quad (1.5)$$

где u_k – стратегия управления бортовой съемочной ЦА k -ого КА ДЗЗ, $\theta_k(u_k)$ – соответствующая этой стратегии программа переориентации КА ДЗЗ, $\Pi_k^*(u_k)$ – рациональная стратегия управления программой перекоммутации радиоканалов в межспутниковых линиях k -ого КА (см. п. 1.3.2). Фактически, значение критерия представляет собой совокупную условную стоимость снимков земных объектов, совершенных за интервал планирования $[t_0, T]$.

С учетом введенных обозначений оперативный съемочный план, как совокупность программ съемок земных объектов каждым КА можно записать как (1.6).

$$\Pi = \{\Pi = \Pi(u) = (u_k, \theta_k(u_k), \Pi_k^*(u_k)), k = \overline{1, K}\}, \quad (1.6)$$

Частная задача планирования формулируется следующим образом: при заданной матрице стоимости определить такую совокупность стратегий управления $u^* = \{u_k, k = \overline{1, K}\}$ бортовой съемочной ЦА КА ДЗЗ и соответствующих им программ переориентации $\theta^* = \{\theta_k, k = \overline{1, K}\}$, которые формируют рациональный план оперативной съемки земных объектов из условия совместной максимизации совокупности критериальных функций (1.5), (1.7).

$$\Pi^* = (u^*, \theta^*(u^*)) = \arg \max_{\substack{u \in U \\ \theta \in \Theta}} [J(u, \theta(u), \Pi_k^*(u_k))], \quad (1.7)$$

где U, Θ – соответственно множества допустимых стратегий управления бортовой съемочной аппаратурой и программ ее переориентации для всех КА системы, при соблюдении ограничений:

- на время маршрута t_k^r (1.8);

$$t_{min}^r \leq t_k^r \leq t_{max}^r, k = \overline{1, K}, \quad (1.8)$$

- на межмаршрутный интервал t_k^{rr} (1.9);

$$t_k^{rr} \leq t_{max}^{rr}, k = \overline{1, K}, \quad (1.9)$$

- на внешние условия съемки (освещенность, минимальный и максимальный углы Солнца);

- на емкость БЗУ КА V_i (1.10);

$$V_i \leq V_{max k}, k = \overline{1, K}, \quad (1.10)$$

- на угол визирования земного объекта бортовой съемочной аппаратурой КА θ_k (1.11);

$$|\theta_k| \leq \theta_{max k}, k = \overline{1, K}, \quad (1.11)$$

- на скорость переориентации КА ДЗЗ $\dot{\theta}_k$ (1.12);

$$|\dot{\theta}_k| \leq \dot{\theta}_{max k}, k = \overline{1, K}, \quad (1.12)$$

- на учет облачности в районе съемок.

В нашем случае, с учетом принятых выше допущений:

- под стратегией управления может быть использована стратегия управления ЛВ за счет изменения угла θ_k в плоскости, ортогональной вектору скорости (угла крена), включая моменты включения/выключения ЦА наблюдения;
- ограничения, связанные с особенностями ретрансляции сигнала могут быть отражены в ограничениях на емкость БЗУ;
- облачность и текущая метеобстановка учитываются в матрице стоимости в виде понижающих коэффициентов, в результате чего на основе условных стоимостей элементарных районов на поверхности Земли формируется обобщенная для всех КА ОГ ДЗЗ заявка.

Для удобного визуального представления, в рамках данной методики, предлагается формировать матрицу стоимости с учетом удобного визуального представления. Для такого представления целесообразно использовать стандартное графическое 24-х битное BMP-изображение (Bitmap Picture), в котором в 3-х байтах (R, G, B) сохранять условную стоимость элементарного района, принципы расчета которой описаны выше. Для того, чтобы большая условная стоимость имела более высокую яркость для объединения двух условных стоимостей в файле можно использовать операцию суммирования в виде (1.13).

$$(R, G, B)_{O1+O2} = (R_{O1} + R_{O2}, G_{O1} + G_{O2}, B_{O1} + B_{O2}), \quad (1.13)$$

где R, G, B – биты красного, зеленого и синего в пикселе RGB24bit изображения. В качестве примера можно привести изображение в градациях серого, в котором байты R, G, B одинаковы.

1.3.2 Частные показатели эффективности и постановка задачи ретрансляции целевой информации

Целевое функционирование КС ДЗЗ в части ретрансляции ЦИ рассматривается при следующих допущениях:

- радиосигналы между КА и абонентскими терминалами распространяются прямолинейно и мгновенно и ретранслируются без временных задержек;
- абонентский терминал способен поддерживать непосредственную связь с каждым КА, находящимся в зоне его радиовидимости;
- влияние помех на процессы передачи информации исключается;
- орбитальная структура КС ДЗЗ за интервал планирования не изменяется.

Основными целевыми операциями КС ДЗЗ в части ретрансляции ЦИ являются прием-передача информации по абонентским линиям связи и информационный обмен в сети КА по межспутниковым линиям. Эти операции осуществляются только в те интервалы (моменты) времени, когда КА и абонентские терминалы находятся в состоянии радиовидимости и способны устанавливать связь друг с другом.

Под планом оперативной коммутации межспутниковых каналов в КС ДЗЗ будем понимать упорядоченное множество временных последовательностей выполнения операций по передаче данных для каждого КА на интервале планирования включая:

- моменты времени включения/выключения бортовой коммутирующей аппаратуры для установления непосредственной связи в сети КА (программа коммутации радиоканалов в МЛС);
- моменты времени перекоммутации бортовой аппаратуры для непосредственной связи КА (программа перекоммутации радиоканалов в МЛС).

Основные параметры такого плана составляют последовательности первого типа, поскольку именно они определяют эффективность целевого функционирования КС ДЗЗ. Программы перекоммутации радиоканалов в межспутниковых линиях и коммутации радиоканалов в абонентских линиях, в свою очередь, определяются программой коммутации радиоканалов в МЛС и техническими возможностями КА. С учетом этого в дальнейшем под планом

оперативной ретрансляции целевой информации будем понимать совокупность программ коммутации радиоканалов в МЛС, образуемых каждым КА системы.

В качестве критерия, характеризующего эффективность ретрансляции целевой информации, отснятой k -м КА ОГ на интервале $[t_0, T]$, можно принять суммарное время, необходимое для ее передачи на интервале планирования с учетом стратегии управления бортовой съемочной ЦА u_{ck} (1.14).

$$T_k(u_{Rk}(u_{ck})) = \sum_{S=1}^S T_S(u_{Rk}(u_{ck})), \quad (1.14)$$

где T_k – время, доступное для ретрансляции целевой информации с k -ого КА за один сеанс передачи данных внутри интервала планирования, S – число допустимых сеансов, u_{Rk} – соответствующая стратегии управления программой перекоммутации каналов связи в межспутниковых линиях k -ого КА, u_{ck} – стратегия управления бортовой съемочной ЦА k -ого КА ДЗЗ.

Тогда эффективность ретрансляции целевой информации всеми КА ОГ на интервале также представляет собой совокупность зависимых друг от друга частных критериев (1.15).

$$T(u_R) = T(u_R(u_C)) = \{T_k(u_{Rk}(u_{ck})), k = \overline{1, K}\}, \quad (1.15)$$

Программы перекоммутации радиоканалов в МЛС и коммутации радиоканалов в абонентских линиях, в свою очередь, определяются программой коммутации радиоканалов в МЛС и техническими возможностями бортовой аппаратуры КА [93]. С учетом этого в дальнейшем под планом оперативной ретрансляции целевой информации будем понимать совокупность программ коммутации радиоканалов в МЛС, образуемых каждым КА системы. Формально на интервале $[t_0, T]$ план может быть записан в виде (1.16).

$$\Pi_R = \{\Pi_{Rk}(u_{Rk}) = (u_{Rk}(u_{ck})), k = \overline{1, K}\}, \quad (1.16)$$

Частная задача планирования формулируется следующим образом: при заданном состоянии орбитальной группировки определить такую совокупность стратегий управления $u_R^* = \{u_{Rk}, k = \overline{1, K}\}$ бортовой коммутирующей аппаратурой КА ОГ которые формируют рациональный маршрут ретрансляции сигнала с КА ДЗЗ на ППИ из условия минимизации времени (1.17).

$$P_R^* = (u_R^*) = \arg \min_{u_R \in U_R} [T(u_R)], \quad (1.17)$$

где U_R – соответственно множество допустимых стратегий управления программой перекоммутации радиоканалов в МЛС, при соблюдении описанных выше ограничений, T – суммарное время передачи информации.

При этом необходимо учитывать тот, что на этапе планирования целевого функционирования КС ДЗЗ может быть сформировано большое число альтернатив планов (1.17), отличающихся по количественному и качественному составу КА-ретрансляторов. Но не все из них могут быть реализованы ввиду ограниченных технических возможностей бортовой аппаратуры КА.

Задача планирования процесса целевого функционирования КС ДЗЗ в части ретрансляции целевой информации состоит в формировании такого плана, который при этом включал бы наименьшее количество КА-ретрансляторов для установления и удержания каналов МЛС и позволял бы при своей реализации на интервале планирования достичь минимально возможного среднего времени доставки данных на НКИ при ограничениях:

- на загруженность БЗУ каждого КА ДЗЗ;
- на загруженность каналов межспутниковой связи;
- на загруженность каналов приема информации в ППИ.

1.4 Сценарий функционирования модернизированной КС ДЗЗ при использовании сетевой архитектуры построения

КС ДЗЗ включает ОГ КА ДЗЗ и НКИ, функционально обеспечивающий непрерывный мониторинг земной поверхности. НКИ представляет собой территориально распределённую сеть пунктов ППИ, оснащённых ПК и объединённых каналами связи для обмена данными. Каждый ППИ реализует полный цикл работы с информацией: приём целевой и телеметрической информации с КА, её передачу по каналам связи, первичную и тематическую

обработку с применением специализированных программных комплексов, а также хранение как ИД, так и производных тематических продуктов.

Целевое назначение ОГ КС ДЗЗ заключается в мониторинге земной поверхности с использованием различных типов ЦА наблюдения, устанавливаемой на борту каждого КА системы. Основным информационным продуктом мониторинга выступает цифровой снимок, представляющий собой совокупность дистанционных измерений интенсивности излучения, отражённого или испускаемого подстилающей поверхностью в заданном районе съёмки. В цифровой форме снимок описывается матрицей размерности $n \times m$, где элемент на пересечении i -й строки и j -го столбца содержит значение интенсивности излучения, соответствующее элементу разрешения $R \times R$ на местности, где R — пространственное разрешение съёмочной аппаратуры [23].

Предполагаемый сценарий функционирования модернизированной КС ДЗЗ предполагает наличие в составе бортовой аппаратуры каждого КА ДЗЗ (либо в большинстве КА) модернизированного АФУ, обеспечивающего возможность приема-передачи потоков целевой информации как между каждым КА из ОГ, так и на НКИ.

При данной архитектуре каналов связи сценарий функционирования включает следующие этапы. На первом этапе при поступлении заявки на данные ДЗЗ радиосигнал с наземного сегмента передаётся на бортовое АФУ ближайшего КА, находящегося в зоне обслуживания наземного сегмента. Далее посредством МЛС между КА ОГ информация о необходимости проведения съёмки конкретного региона ретранслируется на тот КА, который по результатам планирования способен выполнить съёмку с максимальным вкладом в суммарную стоимость информационного продукта. На втором этапе осуществляется непосредственно съёмка наземных объектов целевой аппаратурой. На третьем этапе определяется оптимальный способ максимально оперативной передачи полученной информации на Землю: через межспутниковый канал связи с последующей ретрансляцией на наземный

пункт либо по прямому каналу КА→ППИ — при условии, что КА находится в ЗРВ ППИ и приёмный комплекс свободен для приёма.

При этом, модернизированное АФУ КА, участвующих в организации канала передачи данных, является ретранслятором и передает информацию без записи в БЗУ.

В рамках построения модели функционирования системы принимается допущение о способности каждого КА ОГ к ретрансляции данных в режиме сквозной передачи без промежуточного сохранения в БЗУ. Ретрансляция возможна по двум типам маршрутов:

- на любой последующий КА, находящийся в ЗРВ МЛС;
- непосредственно на любой из заданных ППИ.

Такое допущение позволяет абстрагироваться от ограничений ёмкости БЗУ и сосредоточиться на моделировании динамики информационных потоков и оптимизации маршрутов доставки данных.

В принятой постановке задачи традиционный режим передачи данных с КА непосредственно на пункт ППИ может быть формально представлен как частный случай межспутниковой схемы передачи. Его реализация достигается путём наложения ограничений на ретрансляцию между КА: скорости передачи данных по межспутниковым каналам искусственно задаются нулевыми. Таким образом, информационный поток оказывается «запертым» в рамках прямого канала КА→ППИ, а маршрутизация через другие КА становится невозможной. Такая формализация позволяет унифицировать описание различных режимов функционирования системы и анализировать их в рамках единой модели маршрутизации.

При моделировании процесса ретрансляции принимаются следующие допущения:

- распространение радиосигналов между КА и ППИ, а также между КА осуществляется по прямолинейной траектории и считается мгновенным;

- ретрансляция данных выполняется без учёта временных задержек (включая задержки на обработку, синхронизацию и установление сеанса связи);
- каждый ППИ и каждый КА способны поддерживать непосредственную связь с любым узлом, находящимся в зоне их радиовидимости;
- влияние внешних помех, шумов и потерь пакетов на качество передачи информации исключается;
- топология системы и её структурные параметры остаются неизменными в течение интервала планирования; при этом информация о необходимости съёмки заранее размещена на требуемом КА, а ретрансляция осуществляется при условии возможности передачи полного объёма данных конкретной съёмки.

Указанные допущения позволяют абстрагироваться от второстепенных факторов и сосредоточиться на анализе принципиальной достижимости целевых показателей эффективности, а также на оптимизации маршрутов доставки данных.

Вследствие взаимозависимости подсистем планирования и ретрансляции, опосредованной общим объёмом целевой информации, формируемой и передаваемой этими подсистемами, расчёт соответствующих планов приобретает итерационный характер. Алгоритм включает три последовательные стадии. На первой стадии формируется начальный вариант плана целевого функционирования обеих подсистем, обеспечивающий экстремальные (максимальные или минимальные) значения частных критериев эффективности планирования и ретрансляции. На второй стадии выполняется проверка полученного варианта на соответствие совместным ограничениям, отражающим связанность подсистем через общий объём данных. На третьей стадии из плана исключаются целевые операции, приводящие к нарушению ограничений, после чего процесс повторяется с уточнёнными исходными данными до достижения допустимого решения.

1.5 Выводы по разделу

Проведён анализ современного состояния и перспектив развития КС ДЗЗ, определены основные тенденции развития отечественной группировки КА наблюдения, в том числе:

- рост числа КА в многоспутниковых космических системах;
- преобладание однородных КС ДЗЗ, основу которых составляют однотипные КА с одинаковой по характеристикам ЦА;
- кратный рост числа заявок на съемку.
- прогнозируется совместная эксплуатация систем разных производителей и увеличение числа геоинформационных сервисов, интегрирующих данные с КА разных ОГ.

По результатам системного анализа действующей КС ДЗЗ, включая её информационные продукты и типовые рабочие процессы, предложено усовершенствовать единый методический подход к управлению потоками целевой информации [94]. Развитие подхода ориентировано на более детальный учёт двух ключевых аспектов: процессов планирования работы ЦА КА ДЗЗ и возможностей применения перспективных межспутниковых каналов передачи ЦИ. Такой акцент позволяет повысить согласованность планирования и маршрутизации данных и обеспечить более эффективное использование ресурсов системы.

Основой предлагаемых преобразований служит совместное решение двух взаимосвязанных частных задач.

Первая — планирование съёмки в условиях высокой плотности объектов наблюдения, что обусловлено значительным количеством космических аппаратов ДЗЗ и разнородным характером целевых объектов, требующих мониторинга.

Вторая — модернизация традиционной схемы передачи данных путём дополнения классических каналов связи между КА ДЗЗ и ППИ широкополосными межспутниковыми каналами. Комплексное решение этих

задач позволяет повысить оперативность и полноту покрытия наблюдаемой территории, а также сократить время доставки ЦИ до конечных потребителей.

В рамках решения задачи планирования съёмки предлагается отказаться от раздельного описания заявок через набор параметров приоритетности и частных ограничений в пользу их унифицированного представления. Ключевым элементом новой формализации выступает матрица условной стоимости, которая служит интегральным показателем и объединяет в себе характеристики отдельных заявок, их условную стоимость, пространственные перекрытия (наложения) районов съёмки, а также влияние внешних факторов, в частности, данных метеопрогноза, на целесообразность проведения съёмки. Такой подход позволяет перейти от фрагментированного учёта требований к системному сопоставлению альтернатив при построении оптимального плана.

В рамках решения задачи ретрансляции целевой информации проведён анализ перспективных технологий организации межспутниковой связи. Целями внедрения данных технологий выступают две взаимосвязанные задачи: во-первых, повышение оперативности передачи данных за счёт сокращения временного интервала между моментом съёмки и сбросом результатов на ППИ; во-вторых, снижение влияния неблагоприятных внешних условий на итоговую достоверность получаемых данных ДЗЗ. Достижение указанных целей способствует увеличению условной стоимости информационного продукта за счёт повышения его актуальности и надёжности.

Для обеих задач проведен их анализ, сформированы частные показатели эффективности и сформулирована математическая постановка задачи.

В заключение предложен сценарий функционирования многоспутниковой КС ДЗЗ при использовании сетевой архитектуры передачи данных, позволяющий повысить информационную эффективность при незначительном дооснащении КА ДЗЗ соответствующей аппаратурой.

Итоговым результатом настоящей главы выступает формирование методического задела, служащего основой для разработки программно-математической модели перспективной КС ДЗЗ. Данная модель обеспечивает

возможность системного моделирования различных конфигураций КС ДЗЗ и позволяет обоснованно определять наиболее рациональный состав как орбитальной группировки космических аппаратов, так и наземных комплексов приёма и обработки данных ДЗЗ. Полученный задел создаёт необходимую методологическую базу для последующей количественной оценки эффективности альтернативных проектных решений.

2 Методы и алгоритмы совместного решения задач планирования наблюдений и ретрансляции целевой информации в условиях высокой плотности объектов наблюдения

Решение задачи управления потоками целевой информации в части планирования съемки и дальнейшей ретрансляции ее результатов в НКИ носит стратегический характер для получения максимальной прибыли от выполнения заявок потребителей.

Для ее решения необходимо иметь модели и исходные данные по движению группировки КА ДЗЗ, наземной целевой обстановке, облачности на заданный период, параметрам НКИ и возможным каналам передачи данных (см. раздел 3).

В конечном итоге необходимо решить задачу планирования наблюдений с помощью группировки КА ДЗЗ с учетом заданных характеристик КА и параметров наблюдения для каждой заявки с учетом требований по допустимой облачности и возможностей каналов передачи данных, рисунок 1.9.

В результате оптимизации плана наблюдений, на заданном временном интервале, должны быть построены программы наблюдений для каждого КА в группировке ДЗЗ для выполнения требуемых заявок с учетом ограничений на диапазон и тип съемки, которая имеет максимальную условную стоимость (1.7) плана выполнения заявок потребителей.

2.1 Планирование наблюдений в космических системах ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения

Целью планирования наблюдений в конечном итоге является определение последовательности моментов включения/выключения ЦА и направления ЛВ КА ДЗЗ для получения информационного продукта с наибольшей условной стоимостью.

В разделе 1 представлена постановка оптимизационной задачи планирования наблюдений, в основе которой лежит представление сложной целевой обстановки в виде матрицы стоимости в ячейках которой содержится информация об их условной стоимости информации элементарного района, а ценность информации при этом зависит от конкретных условий его съемки (удаленность от надира и метеообстановка). При этом матрица стоимости может быть представлена наглядно в виде стандартного 24-х битового растрового изображения в формате BMP, рисунок 2.1.

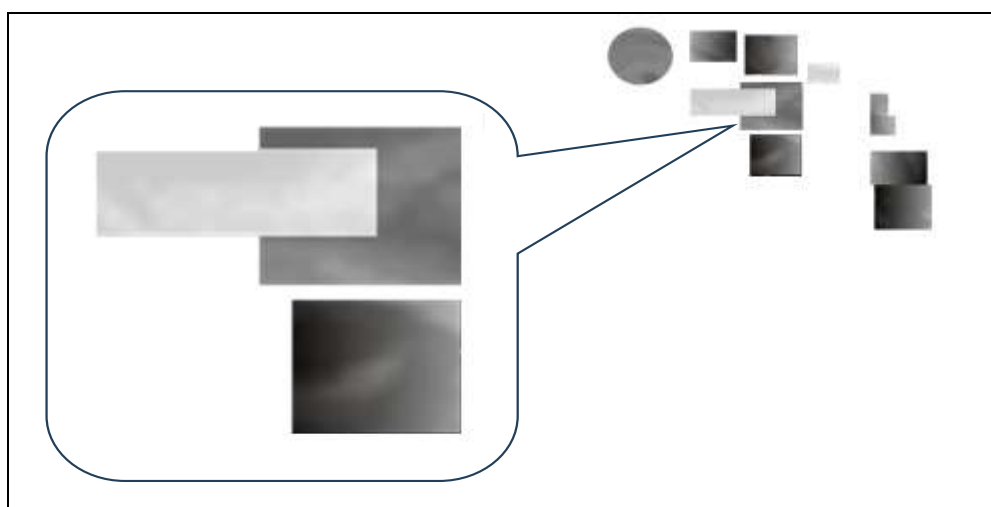


Рисунок 2.1 – Иллюстрация формирования матрицы стоимости в виде BMP24bit изображения (фон для наглядности прозрачный)

Следует отметить, что существенное дробление районов съемки, без дополнительных допущений, приводит в задаче планирования к замедлению классических методов, таких как метод ветвей и границ, генетический алгоритм, метод случайных назначений и др. Это вызвано, в первую очередь, тем, что с увеличением числа районов не прогнозируемо возрастает размерность оптимизационной задачи и глубина рекурсии в численных методах оптимизации. Ниже представлен подход к решению задачи планирования (1.7) - (1.12), который позволяет перейти к оптимизационной задаче прогнозируемой размерности с фиксированной глубиной рекурсии.

Ключевые предложения в развитие существующих методик, в части управления ЛВ, следующие:

1) переход от полигонального представления районов с назначенным приоритетом к геопривязанному BMP24bit растровому с назначением каждой его точки своей условной стоимости. В этом случае задание на расчет плана съемки предполагает растровое слияние районов с учетом их приоритезации и создание одного общего растра, рисунок 2.1. Такое объединение возможно, например, с использованием стандартных механизмов скаляризации с или без привлечения экспертов, либо механизмов неформального анализа, например, с использованием специализированной искусственной нейронной сети.

2) логическое разделение задачи на три взаимоувязанные подзадачи:

- подготовки ИД, в том числе и формирование матрицы стоимости;
- расчета моментов основных событий, таких как вход/выход в зоны радиовидимости, вход/выход в зоны допустимой с точки зрения освещенности съемки и т.п.;
- решение задачи планирования съемки группой КА на заданном интервале.

3) разработка стабильных оптимизационных процедур задачи планирования с учетом требования по уменьшению размерности используемого в них вектора оптимизируемых параметров

В качестве критерия, по которому необходимо проводить оптимизацию программ изменения крена совокупности КА ОГ, необходимо принять совокупную стоимость (1.5) попавших в поле зрения ЦА наблюдения районов с учетом ограничений (1.8) - (1.12).

Нагруженная целевая обстановка характеризуется наличием большого количества КА ОГ, а также площадных и точечных объектов съемки (более 2 000) [93]. В этом случае появляется задача многокритериальной оптимизации, как задача одновременной максимизации совокупности критериев (1.5), как условных стоимостей, попавших в поле зрения аппаратуры наблюдения каждого КА ОГ элементарных районов с учетом соответствующих им ограничений. Следует сразу заметить, что строго математически задача в такой

постановке смысла не имеет, так как минимумы отдельных критериев оптимальности в общем случае достигаются при разных значениях вектора θ [93].

Одним из способов решения такой задачи является формирование контрольных значений [93] для исходных критериев оптимальности $J_k^*(u_k, \theta_k(u_k))$ на основе решения следующих однокритериальных задач (2.1) [76].

$$J_k^*(u_k, \theta_k(u_k)) = \arg \max_{\substack{u \in U \\ \theta \in \Theta}} J_k(u_k, \theta_k(u_k)), \quad k = \overline{1, K}, \quad (2.1)$$

В этом случае совокупность величин J_k^* в пространстве исходных критериев определяет решение, которое можно назвать «абсолютным» максимумом [23-27]. Эта точка достижима лишь в случае, когда все решения в (2.1) совпадают. В остальных же случаях можно говорить лишь о близости к этой точке. Если теперь ввести в рассмотрение некоторую скалярную функцию, характеризующую степень этой близости, то ее можно использовать в качестве нового скалярного критерия оптимальности. В простейшем случае такой функцией может быть квадратичная форма вида (2.2) [76, 93].

$$\tilde{J}(u, \theta(u)) = \sum_{k=1}^K (J_k(u_k, \theta_k(u_k)) - J_k^*)^2, \quad (2.2)$$

В нашем случае, в качестве такого «абсолютного» максимума может быть принята программа условно «идеального» крена θ_k^* ЛВ, которой соответствует непрерывное изменение угла θ_k , обеспечивающее получение максимальной условной стоимости при отсутствии ограничений на условия съемки.

Особенностью здесь является взаимное влияние работы одного КА ДЗЗ на работу другого. Это приводит к необходимости решения оптимизационной задачи при условии совместного решения задачи всеми КА ДЗЗ. Основной трудностью при решении такой задачи является, так называемое, «проклятие размерности», заключающееся в необходимости запоминания на каждом шаге оптимизации функции будущей эволюции всей системы КА ДЗЗ. Запоминание таких функций требует огромного объема памяти и оказывается непосильной

задачей даже для современных компьютеров. В связи с этим необходимо прибегать к различным приближенным методам, основанным на допущениях, к которым предлагается отнести следующие:

- совокупная условная стоимость тематического продукта на всем интервале планирования является суммой совокупных стоимостей на непересекающихся подынтервалах;
- совокупная стоимость на каждом подынтервале определяется как упорядоченная сумма стоимости попавших в поле зрения ЦА наблюдения КА ДЗЗ районов матрицы стоимости при условии, что они не наблюдались другими КА ДЗЗ;
- на любом подынтервале программа изменения угла ЛВ КА ДЗЗ с учетом возможного изменения угла крена каждого КА ДЗЗ формируется на основе программы «идеального» крена и ограничений (1.8) - (1.12);
- задача определения плана ретрансляции целевой информации на ППИ отделена от задачи планирования съемки, но ее результат должен быть учтен при планировании.

Это позволит:

- перейти от неопределенной размерности задачи планирования, зависящей от многих, в том числе неформализуемых факторов, к задаче с прогнозируемой размерностью;
- за счет разделения на подынтервалы, существенно сократить размерность подзадач, решаемых на различных этапах;
- при нагруженной объектовой обстановке гарантировано обеспечить нахождение рационального решения;
- гарантировано обеспечить разрешение неопределенностей, связанных с приоритезацией и учетом облачности в районах съемки.

Таким образом, методика решения задачи включает в себя следующие алгоритмы:

- 1) расчет из условия (2.1) программы «идеального» крена θ_k^* на заданном подынтервале планирования;
- 2) формирование подынтервалов планирования и упорядочивания КА ДЗЗ в расчете совокупной стоимости (п. 2.1.1);
- 3) формирование изменения угла крена линии визирования θ_k каждого КА ДЗЗ на подынтервале планирования на основе программы «идеального» крена θ_k^* (п. 2.2.2).

Результатом решения при этом являются временной план изменения угла крена ЛВ КА ДЗЗ и совокупной стоимости работы ОГ КА ДЗЗ.

2.1.2 Подынтервалы планирования и упорядочивание КА в расчете совокупной стоимости

Основной целью деления интервала планирования на подынтервалы является с одной стороны обеспечение возможности гарантированного решения поставленной оптимизационной задачи, а с другой – обеспечение конкурентности КА ОГ. Идея заключается в том, что в рамках каждого l – го подынтервала решается замкнутая задача оптимизации формирования программы по крену θ_k^l каждого КА ОГ, после чего производится их «бесшовное» объединение. При этом, сравнительно длинные подынтервалы, кратные и превышающие период обращения, а также достаточно малые, рассматривать нецелесообразно в силу вырожденности решения. В первом случае допущения не дают существенного эффекта, а во втором проблемой будет организация их бесшовного объединения при условии выполнения ограничений (1.8) – (1.12).

Моменты времени планирования съемки, приема/передача служебной информации и гарантированной возможности осуществить сброс ЦИ на ППИ, уменьшив тем самым заполненность БЗУ возможны в ЗРВ наземных ППИ. Этот факт логично использовать для формирования длительности подынтервалов планирования. Иными словами, факт выхода КА из ЗРВ можно принять в

качестве момента времени фиксирования окончания подынтервала планирования, рисунок 2.2 (отмечено «X»).

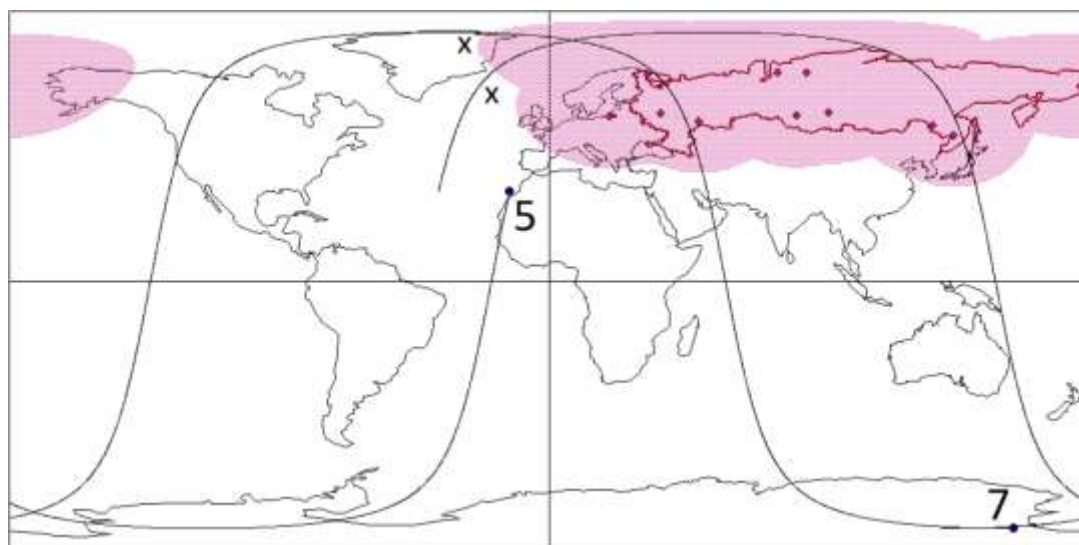


Рисунок 2.2 – Подынтервалы планирования[77]

Решение задачи определения программы управления ЛВ КА ДЗЗ с учетом ограничений (1.8) – (1.12) может быть решено с использованием метода последовательных назначений. В отличие от метода перебора, для него характерно распределение процедуры расчета частных критериев (в нашем случае совокупной стоимости результатов съемки для одного КА на подынтервале планирования) в порядке убывающей важности. В данном случае под важностью подразумевается не значение самого критерия, а то, насколько важным является проведение съемки для данного конкретного КА ДЗЗ.

Если рассмотреть совокупность ограничений (1.8) – (1.12), касающихся условий съемки, то самым важным с системной точки зрения здесь является максимальный объем БЗУ. Действительно, если БЗУ будет заполнено, то съемка невозможна и, следовательно, все остальные ограничения могут не учитываться. Т.к. БЗУ гарантированно освобождается при прохождении КА в зоне радиовидимости обслуживающего наземного пункта и КА опять может быть восстановлен в оптимизационной процедуре, то момент выхода КА из ЗРВ может являться показателем приоритетности расчета частного критерия: чем раньше

происходит выход КА из зоны радиовидимости, тем важнее формирование его программы изменения ЛВ для проведения съемки.

Тогда алгоритм формирования подынтервалов планирования и упорядочивания КА в расчете совокупной стоимости заключается в следующем [76]:

- определяются моменты выхода всех КА из зон радиовидимости;
- определяется порядок упорядочивания КА в расчете совокупной стоимости, соответствующий порядку возрастания моментов времени выхода КА из зон радиовидимости.

Так, для ситуации, представленной на рисунке 2.2, что выше первым из зоны радиовидимости выходит КА с номером 7. Поэтому,

- на первом подынтервале оптимизационные задачи должны решаться в последовательности $\{7, 5\}$ (нам прежде всего важно максимально заполнить БЗУ КА-7 до того, пока он не вышел из зоны радиовидимости);
- на втором подынтервале $\{5, 7\}$, т.к. (нам прежде всего важно максимально заполнить БЗУ КА-5 до того, пока он не вышел из зоны радиовидимости, в то время как БЗУ КА-7 будет максимально свободна для проведения дальнейших съемок).

2.1.3 Программа изменения угла крена линии визирования каждого КА ДЗЗ на подынтервале планирования

Цель – реализовать оптимизационную процедуру (1.7) определение плана включений ЦА наблюдения и программы угла крена ЛВ, с одной стороны удовлетворяющей ограничениям (1.8) – (1.12), а с другой – обеспечивающей прогнозируемое время вычислений и требования к вычислительной среде. В качестве критерия, подлежащего максимизации выступает совокупная стоимость (1.5) районов матрицы стоимости, попадающих в поле видимости ЦА наблюдения.

Выполнение алгоритма производится для каждого КА ДЗЗ из ОГ в порядке, определенном алгоритмом упорядочивания КА ДЗЗ в расчете совокупной стоимости.

Результаты работы алгоритма на каждой итерации сохраняются в виде дополнения в матрицу стоимости информации о том, попал ли район ячейки матрицы стоимости в программу наблюдений или нет. Если район ячейки матрицы стоимости попал в программу наблюдений k – го КА, то для $(k + 1)$ -го КА его стоимость приравнивается 0.

В связи с тем, что при решении оптимизационной задачи одновременный учет всех ограничений (1.8) – (1.12) в силу их особенностей не гарантирует сходимости, решение оптимизационной задачи производится поэтапно, с учетом степени важности ограничений. На каждом этапе последовательно решается локальная оптимизационная задача с учетом отдельных ограничений из (1.8) – (1.12).

1 этап. Наиболее важными ограничениями в (1.8) – (1.12), с учетом которых начинается поэтапная оптимизация являются конструкционные ограничения и ограничения на условия проведения съемки:

- минимальное и максимальное время одного маршрута проведения съемки (1.8);
- минимальный межмаршрутный интервал (1.9);
- минимальный угол Солнца при съемке;
- угол крена при съемке (1.11).

На данном этапе из условия (2.3) производится линейная аппроксимация программы «идеального» крена ЛВ, с последующей оптимизацией полученных в результате нее углов крена. В результате получаем первое приближение, удовлетворяющее вышеперечисленным ограничениям [77], рисунок 2.3.

$$(J_k(u_k, \theta_k(u_k)) - J_k^*)^2 \rightarrow \min, \quad (2.3)$$

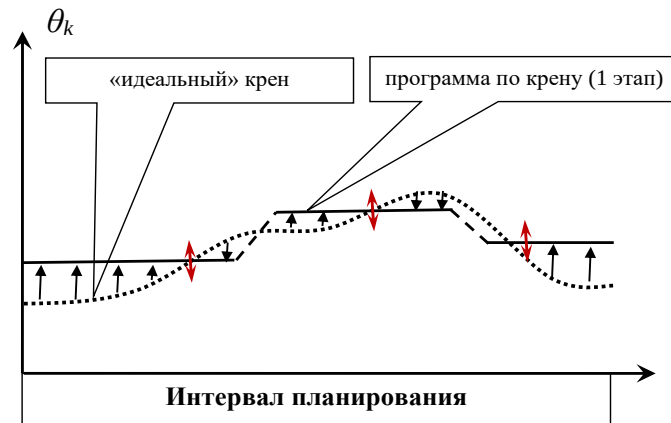


Рисунок 2.3 – Этап 1. Дискретизация программы изменения «идеального» угла крена ЛВ [77]

2 этап. На втором полученная программа уточняется с учетом ограничения (1.12) по угловой скорости перенацеливания по крену [77], рисунок 2.4.

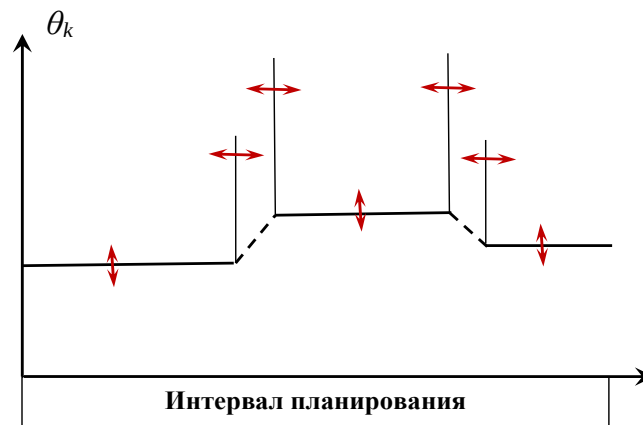


Рисунок 2.4 – Этап 2. Учет скорости переориентации по крену [77]

На 1-м и 2-м этапах в качестве параметров, подлежащих оптимизации, выступают углы крена и моменты включения/выключения ЦА наблюдения.

3 этап. Следующими по важности являются ограничения по максимальному времени работы ЦА наблюдения на витке и максимальной длительности ее работы в сутки. Данные ограничения учитываются за счет суммирования времени работы уже выбранных маршрутов съемки на рассматриваемом интервале (виток и/или сутки, в зависимости от фактического

наличия ограничения) и исключением всех дальнейших маршрутов съемки, когда время работы ЦА превышает заданное в ограничении [77], рисунок 2.5.

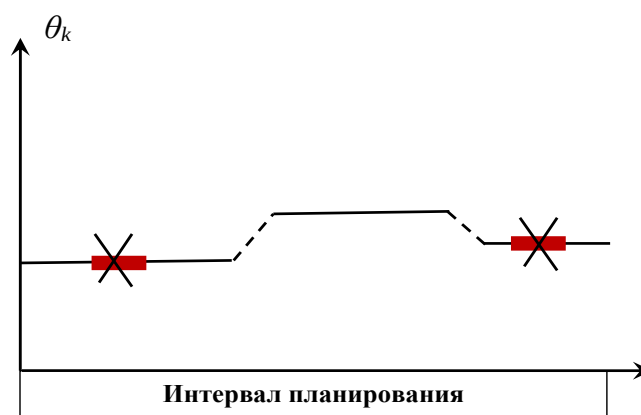


Рисунок 2.5 – Этап 3. Учет ограничений по времени работы [77]

2.2 Ретрансляция целевой информации в космических системах ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения

Задачей ретрансляции является максимально быстрая передача целевой информации в наземный сегмент системы ДЗЗ. В условиях высокой плотности объектов наблюдения ретрансляция подразумевает управление совокупностью способов информационного обмена при выполнении операции по доставке ЦИ, которое позволяет реализовать рациональное совмещение традиционных способов передачи типа КА→ППИ с возможностями МЛС.

Решение такой задачи подразумевает ретрансляцию с маршрутизацией целевой информации от КА ДЗЗ-источника в наземный сегмент на основе информационного взаимодействия КА, входящих в ОГ ДЗЗ. При этом, посредниками такого взаимодействия (передача команд, эфемеридно-временное обеспечение, топология ОГ и другая служебная информации) могут выступать КА связи других ОГ. Список переходов на маршруте от КА ДЗЗ-источника инкапсулируется в заголовке пакета на узле-источнике и используется каждым промежуточным узлом для определения следующего перехода в целях ретрансляции пакета. Соответственно, необходимы методы, позволяющие при

известной информационной топологии ОГ эффективно рассчитать маршрутизацию из исходного КА в наземный сегмент через допустимые узлы ОГ, которыми являются либо другие КА, либо непосредственно сам ППИ. Эффективность целевого функционирования системы ретрансляции определяется совокупными затратами на время передачи информации.

Модель ретрансляции на подынтервале планирования в такой ОГ КА ДЗЗ представляется в виде ориентированного графа Γ , имеющего математическое и геометрическое представление, проиллюстрированное на рисунке 2.6 (ориентированность графа не показана на представленном рисунке в качестве упрощения).

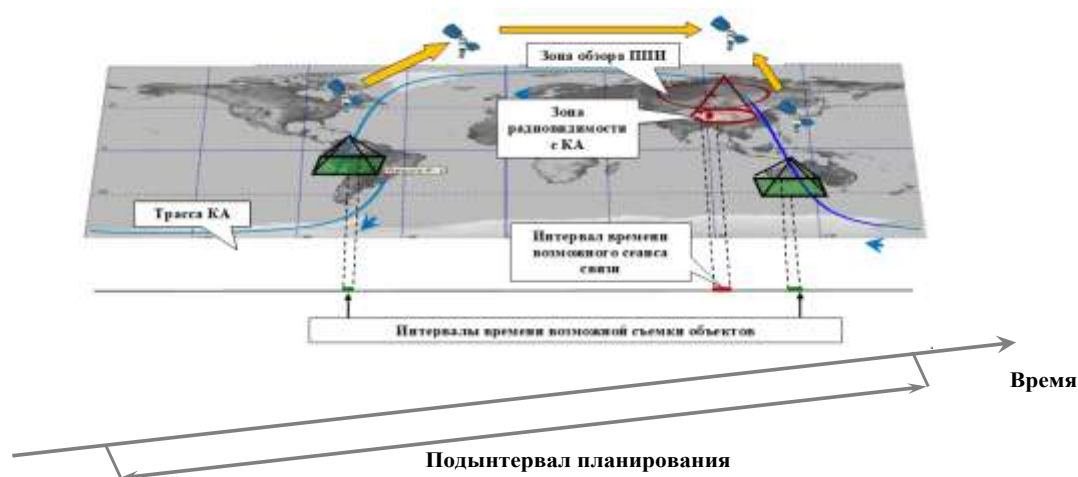


Рисунок 2.6 – Интерпретация процесса ретрансляции в виде графа

Общая модель процесса целевого функционирования представляет собой семейство графов, построенных в предположении, что подынтервалы планирования объединены в одно множество непересекающихся интервалов (моментов), рисунок 2.7.

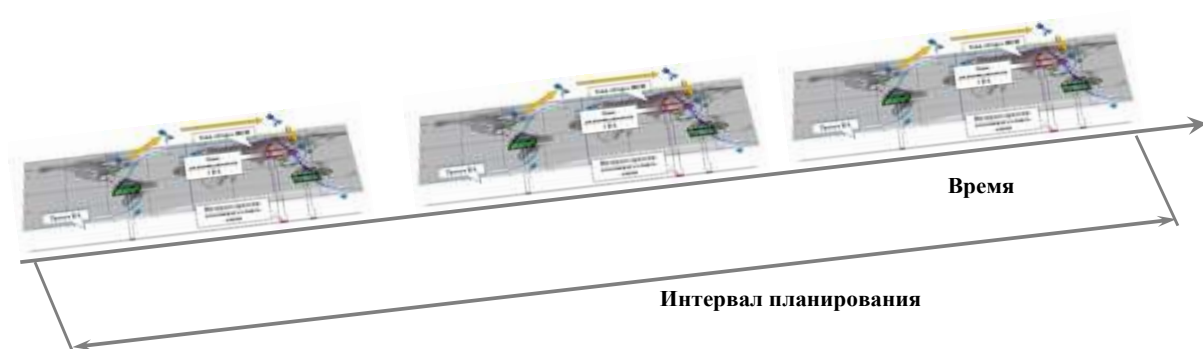


Рисунок 2.7 – Интерпретация процесса ретрансляции в виде семейства графов

Вершины графа Γ представляют собой некое множество целевых операций ОГ КА ДЗЗ, которые формируются в различные совокупности друг с другом с целью непосредственной передачи информационного потока, реализуемые в определенные интервалы времени. В свою очередь, дуги графа определяют связность и формируют совокупности операций выполнения вершин. Исходя из вышесказанного, математическое представление графа представимо в виде (2.4).

$$\Gamma = (Q, L) = (\{Q_i, i = \overline{1, N}\}, \{L_i, i = \overline{1, N}\}), \quad (2.4)$$

где $Q = \{q_j, j = \overline{1, B}\}$, где q_j – номера вершин графа, а B – количество вершин; $L = \{(q_j, q_s), j = \overline{1, B}, s = \overline{1, B}\}$, где (q_j, q_s) – являются обозначением дуги графа между q_j и q_s вершинами. При этом, если дуга между вершинами отсутствует, то и пара (q_j, q_s) также не существует.

Также граф Γ может быть формализован в матрицу вида (2.5), имеющей информацию о взаимосвязи вершин и возможных целевых операциях ОГ КА ДЗЗ.

$$\Gamma_c = \left\| \begin{matrix} z_1^1 & m_{11} & m_{12} & \dots & 0 & n_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_i^1 & m_{i1} & m_{i2} & \dots & m_{ie} & n_{id} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_q^e & m_{q1} & m_{q2} & \dots & m_{ie} & n_{qd} \end{matrix} \right\| = \| z_i^1 \quad m_{i1} \quad \dots \quad m_{ie} \quad n_{id} \|, i = \overline{1, q}, \quad (2.5)$$

где q – количество строк матрицы; Γ_c равно количеству уникальных вершин графа Γ , означающих наземные пункты приема данных, либо числу,

которого будет достаточно для описания всех маршрутов передачи целевых данных. Элементы $z_q^e, e = \overline{1, N_{KA}}$ означают количество целевых операций съемки ОГ КА ДЗЗ, выполнение которых начинается после выполнения предыдущей (при наличии), i – й операции. Элементы $m_{ie}, i = \overline{1, q}, e = \overline{1, N_{KA}}$ представляют собой номера КА, используемых в данном маршруте передачи данных. При этом, если количество КА, используемых в маршруте передачи меньше, чем общее количество КА в рассматриваемой системе вместо номеров КА используются условные обозначения в виде 0 для поддержания прямоугольности матрицы. Элементы $n_{id}, i = \overline{1, q}, d = \overline{1, N_{ППИ}}$ означают номера ППИ, используемые в данном маршруте передачи данных и являющихся в строке последним элементом.

Размерность матрицы Γ_c напрямую связана с количеством запланированных целевых операций съемки ОГ КА ДЗЗ и количеством узлов для передачи данных.

Граф Γ в формализованном виде (2.4), (2.5) позволяет моделировать процесс функционирования всей рассматриваемой системы ОГ КА ДЗЗ, а также одного конкретного КА этой системы.

При этом граф Γ является окончательно сформированным планом работы всей заданной системы ОГ КА ДЗЗ, а в ходе его формирования при помощи алгоритма маршрутизации рассматриваются всевозможные маршруты передачи данных для каждой возможной целевой операции съемки, каждого отдельно взятого КА.

В качестве визуального представления алгоритма маршрутизации представлен на рисунке 2.8, на котором упрощенно изображается процесс формирования различных маршрутов.

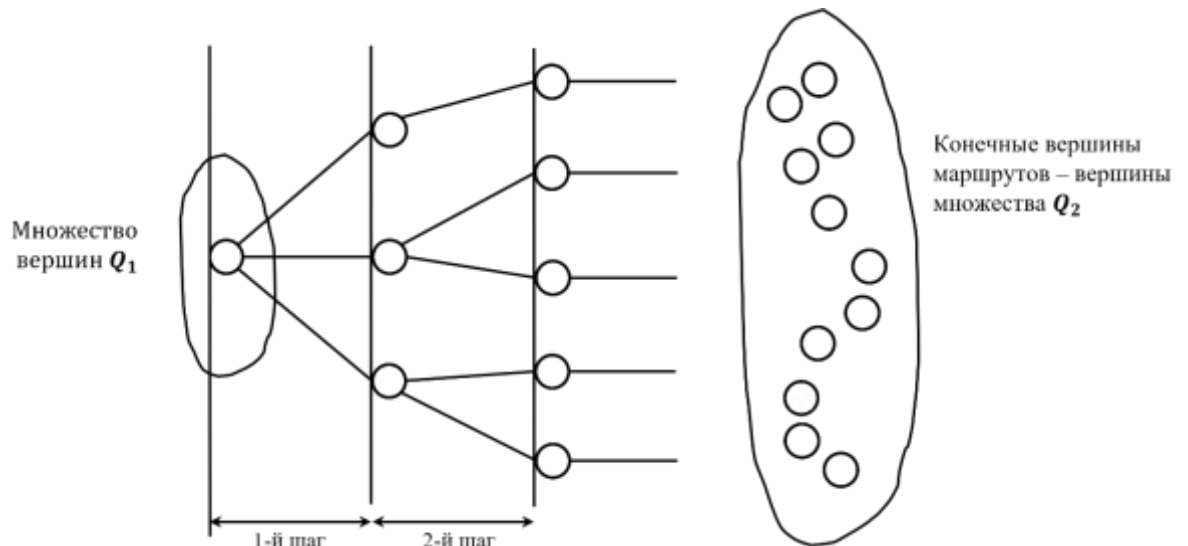


Рисунок 2.8 – Иллюстрация алгоритма маршрутизации

Первым шагом является рассматриваемая целевая операция съемки конкретного КА ДЗЗ. На следующем шаге выбирается любая из доступных целевых операций передачи данных, что может сразу же являться целевой операцией передачи данных на ППИ – в этом случае маршрут регистрируется в графе, как законченный и дальше анализируются другие варианты. Максимальное количество шагов в рассматриваемом алгоритме равно заданному количеству КА в системе, но может окончиться и на первом шаге, как в случае, описанном ранее. Повторяемость узлов в виде КА в ходе формирования маршрута исключается, так как заранее является логичным исключить такие маршруты, в виду худших значений критериев и нелогичности в построении такой системы, где данные будут передаваться с одного КА на другой как в «пинг-понге» до окончательной передачи на Землю. Процедура расширения списка маршрутов будет повторяться до тех пор, пока будут доступны возможные операции передачи данных, что напрямую согласуется с заданным максимально возможным количеством шагов. Дополнительно отмечается, что в ходе поиска возможных узлов передачи данных сразу же проверяется целевая возможность передачи данных – размер доступного временного интервала для передачи маршрутов, учитывая заданные характеристики радиолиний между рассматриваемым узлами.

Формально процесс поиска допустимых маршрутов передачи данных включает два последовательных этапа.

На первом этапе производится расширение множества маршрутов на основании выражения (2.5).

На втором этапе выполняется отсев заведомо неработоспособных или наименее предпочтительных маршрутов. Отсечение осуществляется на основе логического анализа по следующим критериям: невозможность доставки данных до конечного пункта приёма (отсутствие целевых операций передачи после заданного момента времени или недостаточная длительность временного интервала с учётом характеристик радиолиний между узлами), а также передача данных на узел, уже присутствующий в текущем маршруте, что означает образование петли. Результатом является сокращённое множество маршрутов, удовлетворяющих базовым требованиям реализуемости (например, передача данных с КА №1 на КА №2 и снова на КА №1).

Фактически, предлагаемый подход состоит в построении модели ретрансляции при целевом функционировании ОГ КА ДЗЗ, с учетом организации процедуры несложной маршрутизации, описанной выше. Предложенный подход обеспечивает существенную экономию технологических и временных ресурсов на последующих этапах анализа. Это достигается за счёт исключения из рассмотрения заведомо неработоспособных вариантов до проведения ресурсоёмких расчётов, учитывающих общую загруженность линий связи в системе. Таким образом, вычислительная нагрузка концентрируется исключительно на допустимых маршрутах, что повышает общую эффективность процедуры оценки реализуемости. Упрощённая блок-схема алгоритма маршрутизации, реализованного в программном обеспечении, приведена на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Упрощенная блок-схема алгоритма маршрутизации

Ключевым упрощением, реализованным в представленной блок-схеме алгоритма маршрутизации, выступает «закрытость» блока проверки всех записанных маршрутов на условие окончания поиска. Данный этап играет определяющую роль в работе алгоритма: он фиксирует момент завершения генерации дополнительных вариантов маршрутов и одновременно обеспечивает идентификацию заранее нереализуемых траекторий передачи данных в соответствии с ранее описанными критериями отсека. Такая организация логики позволяет формализовать критерий останова поиска и гарантировать, что дальнейшая обработка будет проводиться только над допустимыми маршрутами.

Методика реализации СПО представлена в следующей главе настоящей работы.

Отдельно нужно отметить, что в последующей экспериментальной отработке будут рассмотрены 3 различных варианта маршрутизации:

1) «классический» вариант с выбором предполагаемых вариантов передачи данных. Используются только наземно-космические линии связи, проще говоря, моделирование существующей структуры КС ДЗЗ;

2) модернизированный вариант с возможностью использования дополнительных космических каналов связи, но с условием невозможности записи данных в БЗУ КА для ожидания передачи данных на следующий шаг. Данный вариант позволит смоделировать модуль ретрансляции, который возможен к реализации на отечественной системе ДЗЗ уже сейчас (с использованием ГСР);

3) модернизированный вариант с возможностью использования дополнительных космических каналов связи, а также с возможностью записи данных в БЗУ промежуточных КА. Данный вариант предполагается к использованию в перспективных, масштабируемых по количеству КА ОГ ДЗЗ, объемы данных которых будут бесконечно возрастать.

Для получения различного результата от описанного алгоритма маршрутизации в СПО используются входные данные о возможностях наличия каналов связи между каждым узлом (КА-КА или КА-ППИ). Такой подход позволяет достаточно просто сформировать любой из перечисленных выше вариантов за счет внесения запретов на использование определенных каналов. Так, в «классическом» варианте при помощи исходных данных может быть сформирован запрет на создание МЛС, что будет автоматически учитываться на этапе формирования списка целевых операций передачи данных при анализе межспутниковых ЗРВ.

2.3 Выводы по разделу

В разделе представлена методика решения задач планирования наблюдений в условиях высокой плотности объектов наблюдения. Основу предлагаемой методики составляет разделение задачи планирования на две взаимоувязанные подзадачи: планирование процессов съемки земной

последовательности и дальнейшей ретрансляции целевой информации на Землю с использованием существующих и перспективных каналов обмена информацией, в частности, на основе МЛС. Такое разделение возможно по причине существенной дифференциации их вклада в принятые системные показатели эффективности: условную стоимость полученной информации и время (оперативность) ее получения.

Условная стоимость информации формируется за счет проведения наблюдений. Под планированием наблюдений понимается определение времени наблюдений и направлением ЛВ КА ДЗЗ. В этой части ключевые предложения в развитие существующих методик следующие:

1) переход от традиционного полигонального представления районов с назначенным приоритетом к геопривязанному BMP24bit растровому с назначением каждой его точки своей условной стоимости. В этом случае задание на расчет плана съемки предполагает растровое слияние районов с учетом их приоритезации и создание одного общего растра. Такое объединение возможно, например, с использованием стандартных механизмов скаляризации с или без привлечения экспертов, либо механизмов неформального анализа, например, с использованием специализированной искусственной нейронной сети.

В этом случае в качестве критерия, по которому необходимо проводить оптимизацию программ изменения крена совокупности КА ОГ ДЗЗ принимается совокупная стоимость попавших в поле зрения ЦА наблюдения районов с учетом соответствующих ограничений;

2) логическое разделение задачи планирования наблюдений на три взаимоувязанные подзадачи:

- подготовки ИД, в том числе и формирование матрицы стоимости;
- расчета моментов основных событий, таких как вход/выход в ЗРВ, вход/выход в зоны допустимой с точки зрения освещенности съемки и т.п.;
- решение задачи планирования съемки группой КА ДЗЗ на заданном интервале;

3) разработка стабильных оптимизационных процедур задачи планирования с учетом требования по уменьшению размерности используемого в них вектора оптимизируемых параметров. При этом, для снижения нагрузки на численные методы оптимизации и обеспечения гарантированности сходимости, решение задачи производится поэтапно, с учетом степени важности имеющихся ограничений. На каждом этапе последовательно решается локальная оптимизационная задача с учетом отдельных ограничений из (1.8) – (1.12).

Оперативность получения информации напрямую зависит от способов ретрансляции ее на Землю.

В качестве задачи ретрансляции является максимально быстрая передача целевой информации в наземный сегмент системы ДЗЗ. В условиях нагруженной целевой обстановки ретрансляция подразумевает управление совокупностью способов информационного обмена при выполнении операции по доставке целевой информации, которое позволяет реализовать рациональное совмещение традиционных способов передачи типа КА→ППИ с возможностями МЛС.

Решение такой задачи подразумевает ретрансляцию с маршрутизацией целевой информации от КА ДЗЗ источника в наземный сегмент на основе информационного взаимодействия КА, входящих в ОГ ДЗЗ. При этом, посредниками такого взаимодействия (передача команд, эфемеридно-временное обеспечение, топология ОГ и другая служебная информации) могут выступать КА связи других ОГ. Список переходов на маршруте от КА ДЗЗ-источника инкапсулируется в заголовке пакета на узле-источнике и используется каждым промежуточным узлом для определения следующего перехода в целях ретрансляции пакета. Соответственно, необходимы методы, позволяющие при известной информационной топологии ОГ эффективно рассчитать маршрутизацию из исходного КА ДЗЗ в наземный сегмент через допустимые узлы ОГ, которыми являются либо другие КА, либо непосредственно сам ППИ. Эффективность целевого функционирования системы ретрансляции определяется совокупными затратами на время передачи информации.

3 Принципы построения и технический облик специализированного программного обеспечения

В предыдущих главах сформирован сценарий функционирования модернизированной КС ДЗЗ сетевой архитектуры построения, а также методика совместного решения задач планирования наблюдений и ретрансляции целевой информации в условиях высокой плотности объектов наблюдения. Для проведения экспериментальной отработки предложенной методики разработан комплекс программ, состоящий из двух СПО.

Данная глава описывает архитектуру и порядок применения СПО в комплексе, при помощи которого моделируется сценарий работы различных систем ДЗЗ, как сетевой, так и традиционной архитектуры построения. Заданный сценарий работы регулируется при помощи исходных данных, где отдельно задается баллистическая структура конкретных КА ДЗЗ, а также наличие и характеристика МЛС.

Программный комплекс позволяет в автоматизированном режиме решать задачу планирования съемки ДЗЗ и передачи ЦИ с борта КА ДЗЗ на Землю, распределяя потоки ЦИ в заданной системы, исходя из частных показателей эффективности.

3.1 Методика построения и архитектура специализированного программного обеспечения

Комплекс программ создан с использованием свободно распространяемой СУБД PostgreSQL и высокоуровневого языка программирования Python 3.10+, при использовании следующих общедоступных библиотек:

- datetime, входящий в стандартный набор библиотек Python;
- math, входящий в стандартный набор библиотек Python;
- multiprocessing, входящий в стандартный набор библиотек Python;
- os, входящий в стандартный набор библиотек Python;

- configparser, версии 5.2.0;
- pathlib, входящий в стандартный набор библиотек Python;
- numpy, версии 1.24.2;
- pandas, версии 1.5.3;
- psycorg2, версии 2.9.3;
- matplotlib, версии 3.7.0.

Комплекс программ создан из БД и консольных приложений с выводом результирующих текстовых файлов, а также графических изображений для визуализации планируемых съемок, загруженности линий связи («КА-КА» и «КА-Земля»), ППИ и БЗУ КА. Архитектура разработанного комплекса программ, в упрощенном виде, представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Архитектура построения разработанного комплекса программ

Предполагается, что во время работы комплекса программ осуществляется взаимодействие с настроенной структурой каталогов, программных модулей, а также с настроенной и заполненной в соответствии к предполагаемому моделированию БД.

В реализованной структуре каталогов осуществляется хранение промежуточных (создаваемых в процессе работы программ и используемые в дальнейшем), а также хранения результатов моделирования для возможности их последующего анализа. Основные исходные данные для работы комплекса программ хранятся в централизованной БД, структура которой представлена в таблице 3.1. Обращение к БД происходит при инициализации ИД в отдельных

СПО. Подготовка ИД (заполнение БД) осуществляется при помощи открытого ПО администрирования БД pgAdmin.

Таблица 3.1 – Структура БД хранения исходных данных

№	Название таблицы	Описание таблицы	Атрибуты	Описание атрибутов
1.	request	Перечень заявок	request_id	Идентификационный номер заявки
			client_id	Идентификационный номер заказчика
			primary	Приоритет
			type_ka	Требуемый тип КА (необязательно)
			target_equipment_id	Требуемый тип ЦА (необязательно)
			required_resolution	Требуемое разрешение, м
			state	Статус
2.	region	Перечень участков	region_id	Идентификационный номер участка
			start_planning	Начало планирования
			end_planning	Конец планирования
			coordinates	Координаты участка
			angle	Максимальный угол от надира, град.
			percent	Максимальный процент облачности
			angle_sun	Минимальный допустимый угол Солнца, град
			request_id	Идентификационный номер заявки
			state	Статус
3.	client	Перечень потребителей	client_id	Идентификационный номер участка
			name	Наименование клиента
			primary	Приоритет
4.	satellite	Параметры КА с его ограничениями	satellite_id	Идентификационный номер КА
			code	Код КА
			norad_number	Номер КА (NORAD)
			roll	Угол по крену, град.
			roll_rate	Скорость поворота по крену, град./с
			capacity_storage	Максимальный объем БЗУ, Мбит
			delay_transmission	Длительность подготовки данных к передаче после съемки, с

№	Название таблицы	Описание таблицы	Атрибуты	Описание атрибутов
5.	equipment_satellite	Соответствие (связь) ЦА и КА	type_ka	Тип КА
			primary	Приоритет КА
			state	Статус
			equipment_sat_id	Идентификационный номер соответствия ЦА и КА
			equipment_id	Идентификационный номер ЦА
			satellite_id	Идентификационный номер КА
			angle_alfaX	Угол установки ЦА относительно alfaX, град
			angle_alfaY	Угол установки ЦА относительно alfaY, град.
			angle_alfaZ	Угол установки ЦА относительно alfaZ, град.
			state	Статус
6.	equipment_mode	Параметры режима работы ЦА	equipment_mode_id	Идентификационный номер режима ЦА
			equipment_id	Идентификационный номер ЦА
			width_angle	Угловое поле зрения, град.
			route_time_min	Минимальное время маршрута, с
			route_time_max	Максимальное время маршрута, с
			between_route_time	Минимальный межмаршрутный интервал, с
			memory_rate	Расход памяти при съемке, Гбит/с
			compress	Коэффициент сжатия информации
			resolution	Разрешение, м
			max_duration_day	Максимальная длительность работы за сутки (необязательно), с
			max_duration_coil	Максимальная длительность работы за виток (необязательно), с
			max_switch_coil	Максимальное количество включений на витке (необязательно)

№	Название таблицы	Описание таблицы	Атрибуты	Описание атрибутов
7.	equipment	ЦА	equipment_id	Идентификационный номер ЦА
			name	Наименование ЦА
			type_equipment	Тип ЦА
8.	simultaneous_equipment	Признак возможной одновременной работы ЦА	equipment_sat_id1	Идентификационный номер соответствия ЦА и КА
			equipment_sat_id2	Идентификационный номер соответствия ЦА и КА
9.	center	Параметры ППИ	center_id	Идентификационный номер ППИ
			center_coord	Географическое расположение ППИ
10.	antenna	Параметры ПК	antenna_id	Идентификационный номер ПК
			name_antenna	Наименование ПК
			speed_transfer	Скорость приема данных, Мб/с
			time_before	Время подготовки ПК до начала сеанса, с
			time_after	Время подготовки ПК после сеанса, с
			angle	Минимальный угол места, °
			status	Статус работы ПК
			center_id	Идентификационный номер ППИ установки ПК
11.	center_satellite	Возможность работы КА с ПК	antenna_sat_id	Идентификационный номер связи КА и ПК
			satellite_id	Идентификационный номер КА
			antenna_id	Идентификационный номер ППИ

Исходя из представленной на рисунке 3.1 архитектуре реализованного программного комплекса, СПО планирования съемки ДЗЗ формирует исходные данные для СПО распределения ЦИ ДЗЗ, что предполагает соответствующую очередность вызова СПО. При этом, СПО распределения ЦИ ДЗЗ позволяет моделировать различную конфигурацию линий связи для распределения ЦИ ДЗЗ с одним и тем же набором данных от СПО планирования съемки ДЗЗ.

Функциональные возможности СПО планирования съемки ДЗЗ:

- чтение исходных данных в БД из состава комплекса программ управления потоками ЦИ перспективных сетевых ОГ ДЗЗ о заявках на съемку, составе и конфигурации ОГ КА ДЗЗ;
- чтение информации о прогнозе движения ОГ заданного состава на заданный период планирования;
- формирование матрицы условной стоимости работы КА ДЗЗ в единицу времени для возможных углов отклонения от надира;
- формирование перечня возможных съемок (периодов включения ЦА съемки) каждого КА ДЗЗ в форматах *.pru и *.xlsx.

Функциональные возможности СПО распределения ЦИ ДЗЗ:

- чтение исходных данных в БД из состава комплекса программ управления потоками ЦИ перспективных сетевых ОГ ДЗЗ о составе и конфигурации ОГ КА ДЗЗ, ОГ связи, ППИ и ПК;
- чтение перечня возможных съемок (периодов включения ЦА съемки) каждого КА ДЗЗ в форматах *.pru и *.xlsx;
- чтение исходных данных о конфигурации линий связи между различными узлами КС ДЗЗ (узлами КС ДЗЗ является любая сущность способная принять или ретранслировать ЦИ ДЗЗ) в формате *.ini;
- моделирование распределения ЦИ ДЗЗ между различными узлами КС с целью доставки ЦИ ДЗЗ от КА ДЗЗ на Землю;
- формирование опорного плана работы заданной ОГ КА, учитывая загруженность БЗУ и ПК.

3.2 СПО решения задачи формирования плана съемки в условиях нагруженной целевой обстановки

СПО планирования съемки ДЗЗ предназначено для формирования рациональных планов возможных включений ЦА наблюдения разнотипных

КА ДЗЗ при различных конфигурациях КС ДЗЗ и учете ограничений работы ЦА наблюдения в составе КА ДЗЗ.

СПО планирования съемки ДЗЗ состоит из нескольких модулей:

- «Инициализация исходных данных»;
- «Баллистика»;
- «Облачность»;
- «Планировщик работы ЦА наблюдения».

Модуль «Инициализация исходных данных» обеспечивает подготовку исходных данных для дальнейшей работы СПО при помощи запросов в БД. Основными исходными данными, запрашиваемыми из БД, в ходе работы модуля являются:

- перечень заявок на съемку;
- конфигурация НКИ;
- состав и характеристики ЦА наблюдения КА ДЗЗ;
- НУ движения КА ДЗЗ.

Модуль «Баллистика» проводит прогнозирование движения спутников заданной ОГ КА ДЗЗ при помощи модели SGP4. Основными исходными данными для работы модуля «Баллистика» являются двухстрочные наборы данных (TLE), производимых NORAD и NASA для существующих КА. При этом, двухстрочные наборы данных допускается формировать при помощи кеплеровских элементов для любого КА. Дополнительно, при начале работы СПО пользователь может задать уточняющие файлы движения трасс КА с различным шагом и рассчитанными при помощи других баллистических моделей. В случае предоставления дополнительных файлов трасс КА модуль аппроксимирует данные с помощью уравнений Кеплера. Файлы трасс КА должны включать в себя следующие данные:

- номер витка;
- дата (д.м.г);
- время UTC+03 (ч:м:с);

- координата X АГЭСК, км;
- координата Y АГЭСК, км;
- координата Z АГЭСК, км;
- проекция скорости на ось X АГЭСК, км/с;
- проекция скорости на ось Y АГЭСК, км/с;
- проекция скорости на ось Z АГЭСК, км/с;
- географическая широта подспутниковой точки, °;
- географическая долгота подспутниковой точки, °;
- расстояние до Солнца, а.е.;
- долгота Солнца, °;
- широта Солнца, °.

Модуль «Облачность» формирует матрицу облачности, где разыгрывает вероятность наличия облачности в каждой ячейки матрицы на всю поверхность Земли. Полученная вероятность наличия облачности основывает на заданных пользователем статистических данных в формате excel-таблицы, где страницы документа являются порядковыми номерами календарных месяцев, а столбцы и строки каждой страницы содержат баллы облачности от 0 до 10 по долготе и широте соответственно (с равным шагом). На рисунке 3.2 представлен пример визуального отображения сформированной матрицы облачности.



Рисунок 3.2 – Пример сформированной матрицы облачности

Данные, формируемые модулями «Инициализация исходных данных», «Баллистика», «Облачность» являются исходными данными для итогового модуля «Планировщик работы ЦА наблюдения», который формирует перечень наиболее выгодных операций съемки выполняемых каждым заданным КА ДЗЗ, исходя из ограничений работы ЦА наблюдения, а также количества и конфигурации заявок. В промежуточном этапе работы модуля формируется матрица условной стоимости работы КА ДЗЗ для каждой единицы периода планирования (1 с) и возможных углов визирования (с шагом 1 °). На рисунке 3.3 представлен фрагмент рассчитанной матрицы условной стоимости работы КА ДЗЗ с возможностью отклонения по углу визирования от -10 ° до 10 °, где строки служат единицей времени работы КА, а столбцы – возможным углом визирования.

1	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
98	0.03	0.03	0	0	0.06	0.08	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	0	0	0.03	0.06	0	0.01	0.05	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.02	0	0	0	0.08	0.08	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
101	0	0.03	0.05	0	0	0.12	0.08	0.04	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0.06	0.06	0.01	0.01	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0	0
103	0.03	0.04	0	0	0	0.08	0.08	0.01	0	0.33	5.23	0.16	0.04	0.02	0.13	0.08	0	0	0.03	0.04	0
104	0	0	0.05	0.04	0.01	0.01	0.23	0.32	0.86	0.16	0.65	2.94	0.51	0.02	0.01	0.01	0.06	0.06	0	0	0.03
105	0.02	0	0	0.01	0.08	0.15	0.02	0.03	0.51	2.04	0.65	0.16	0.04	0.23	0.18	0.01	0	0	0.05	0.03	0
106	0	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.31	0.32	0.04	0.16	8.17	2.04	0.04	0.02	0.01	0.12	0.06	0	0	0.04	0.02
107	0	0	0	0.04	0.11	0.01	0.02	0.49	0.61	2.04	0.65	0.16	0.51	0.33	0.01	0.01	0	0.04	0.03	0	0
108	0.02	0.03	0	0	0.01	0.2	0.23	0.03	0.06	2.04	8.17	0.16	0.04	0.02	0.18	0.08	0	0	0	0.03	0.03
109	0	0	0.03	0.06	0.01	0.01	0.01	0.32	0.51	0.16	0.65	2.04	0.74	0.02	0.01	0.01	0.06	0.04	0	0	0.02
110	0.03	0	0	0	0.11	0.11	0.02	0.03	0.51	2.04	11.8	0.16	0.04	0.33	0.13	0.01	0	0	0.03	0.04	0
111	0	0.04	0.03	0	0	0.01	0.15	0.23	0.04	0.16	11.8	2.04	0.04	0.02	0.01	0.08	0.08	0	0	0	0.02
112	0	0	0	0.02	0.01	0	0.01	0.02	0.74	2.04	0.65	0.16	0.51	0.23	0.01	0.01	0	0.06	0.05	0	0
113	0.03	0.02	0	0	0	0.03	0.13	0.02	0.04	0.16	8.17	2.04	0.04	0.02	0.13	0.12	0	0	0	0.03	0.01
114	0	0	0	0	0	0	0.01	0.33	0.51	0.16	0.65	2.04	0.51	0.02	0.01	0.01	0.08	0.04	0	0	0

Рисунок 3.3 – Фрагмент матрицы условной стоимости работы КА ДЗЗ

На рисунке 3.4 изображен пример перечня возможных операций съемки, сформированных при учете ограничений работы ЦА наблюдения в составе моделируемого КА ДЗЗ. Строки перечня являются выбранными целевыми операциями съемки, а столбцы:

– время включения ЦА наблюдения в секундах от начала периода планирования;

- время выключения ЦА наблюдения в секундах от начала периода планирования;
- угол визирования КА ДЗЗ, °;
- условная стоимость целевой операции съемки;
- идентификационный номер ЦА наблюдения;
- объем, формируемый в БЗУ КА ДЗЗ при выполнении съемки, Гб.

1	Tn	Tk	roll	J	CAid	V
2	3755	3759	-10	5039.838	5	0.28
3	8340	8356	0	14.07857	5	0.952
4	8837	8889	0	2.07E+08	6	21.2
5	8851	8950	0	3.87E+08	5	5.6
6	8966	8975	0	6.649581	6	4
7	9016	9111	0	2.76E+08	6	38.4
8	9093	9192	0	5.05E+08	5	5.6
9	9939	9964	6	179013.5	6	10.4
10	9953	9960	6	0.01723	5	0.448
11	10019	10020	4	0.006526	6	0.8

Рисунок 3.4 – Пример перечня возможных операций съемки

Подобный перечень возможных операций съемки формируется для каждого заданного КА ДЗЗ и является выходными данными СПО планирования съемки ДЗЗ.

В ходе разработки СПО, а также анализа возможных исходных данных выявлена проблема существенного увеличения времени вычислений при расчете матриц условной стоимости работы в единицу времени каждого КА ДЗЗ. Для получения наилучшего результата требуется рассмотреть всевозможные операции съемки (при различных вариантах угла визирования, с заданным шагом). Необходимые к рассмотрению в ходе работы СПО данные предполагают сверхбольшое количество операций в расчете. Например, рассмотрение возможных операций съемки на стуки с шагом в одну секунду, для одного КА ДЗЗ, с возможным углом визирования от -40° до 40° (с шагом 0.1) предполагает не менее 69 млн. возможных вариантов, каждый из которых содержит как минимум несколько операций расчета. Для компенсации

выявленной проблемы существенного увеличения времени вычислений использовано распределение обработки между доступными ядрами процессора, с возможностью дополнительной настройки – заданием количества одновременно используемых логических ядер. Количество используемых логических ядер не должно превышать количества доступных в используемом на персональной электронно-вычислительной машине (ПЭВМ) процессоре, при этом вводится техническое ограничение на работу СПО – она может быть выполнена при наличии более, чем двух логических ядер процессора.

Архитектура разработанного СПО планирования съемки ДЗЗ представлена на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Архитектура СПО планирования съемки ДЗЗ

3.3 СПО решения задачи ретрансляции целевой информации в сетевых спутниковых группировках

СПО распределения ЦИ ДЗЗ предназначено для моделирования процесса передачи ЦИ от КА ДЗЗ на ППИ. Распределение ЦИ ДЗЗ осуществляется исходя из заданной конфигурации КС, что позволяет моделировать работу системы как с МЛС, так и без них. Настройка конфигурации КС осуществляется при помощи

построения возможных линий связи между различными узлами системы (КА ДЗЗ, КА связи и ПК), при этом связь между ними доступна только в случае прямой видимости. Параметры конфигурации линий связи КС задаются в файле `params.ini`, который содержит в себе:

- максимальное значение одновременного потока данных для загруженности межспутниковых линий связи каждого КА (например, не более 1 потока данных в единицу времени, что ограничивает поток данных);
- скорость ВРЛ для межспутниковой линии связи каждого КА, Мб/с (скорость передачи данных определяется минимальным значением между узлами участвующими в передаче);
- параметр наличия межспутникового канала связи для каждой пары КА;
- максимальное значение одновременного потока данных для загруженности наземно-космических линий связи для каждого ПК (по аналогии с межспутниковой связью);
- высота атмосферы, где предполагается ограничение работы межспутниковых линий связи из-за высокой возможности получения дополнительных помех, км (упрощенный учет атмосферы, влияющий на наличие прямой видимости между парой КА);
- выбор метода распределения ЦИ ДЗЗ:
 - 1) использование МЛС только для ретрансляции данных (без записи данных в БЗУ промежуточных КА);
 - 2) использование МЛС, с возможностью записать данные в БЗУ промежуточных КА (что позволить передавать данные с их задержкой в промежуточных КА).

СПО распределения ЦИ ДЗЗ состоит из нескольких модулей:

- «Инициализация исходных данных»;
- «Баллистика»;
- «Планировщик информационных потоков»;
- «Анализ результатов».

Модули «Инициализация исходных данных» и «Баллистика», как и в СПО планирования съемки ДЗЗ обеспечивают подготовку исходных данных для дальнейшей работы СПО. При этом, основными отличиями реализации данных модулей в СПО распределения ЦИ ДЗЗ являются:

- чтение конфигурационного файла params.ini и составление матриц связей и нахождения в ЗРВ между парами «КА-КА» и парами «КА-ППИ» (модуль «Инициализация исходных данных»);
- чтение результирующих данных СПО планирования съемки ДЗЗ для получения возможных к выполнению маршрутов съемок (модуль «Инициализация исходных данных»);
- заполнение матриц нахождения в ЗРВ между парами «КА-КА» и парами «КА-ППИ» при прогнозировании движения спутников заданной ОГ КА (модуль «Баллистика»).

Модуль «Планировщик информационных потоков» позволяет провести моделирование распределения информационных потоков ДЗЗ с целью передачи данных, в заданных условиях. На вход модуля поступают подготовленные к обработке матрицы загруженности доступных линий связи, загруженности БЗУ КА и перечень маршрутов съемки, рассчитанных при помощи СПО планирования съемки. В ходе работы модуль «Планировщик информационных потоков» создает следующий перечень промежуточных файлов:

- текстовые файлы с всевозможными маршрутами передачи каждой съемки. Файлы создаются в каталоге «result\datfiles». Для каждого КА ДЗЗ программа создает свой подкаталог с наименованием, соответствующим его коду. Для каждого маршрута передачи данных указывается:

- 1) идентификационный номер варианта передачи данных (в квадратных скобках);
- 2) параметры маршрута съемки:
 - а) время начала и окончания работы ЦА съемки, в секундах от момента начала планирования;

б) угол визирования, °;

в) условная стоимость маршрута съемки (J), рассчитанная на этапе работы СПО планирования съемки;

г) идентификационный номер типа операции (1 – маршрут съемки, 2 – передачи данных с КА на ППИ, 4 – передача данных от начального КА ДЗЗ другому КА по межспутниковой связи, 5 – промежуточная передача данных на рассматриваемом КА с использованием межспутниковой связи);

д) идентификационный номер ЦА съемки (согласно БД);

е) объем маршрута съемки, Гб;

ж) параметр выполнения операции (0 – не выполнена, 1 – выполнена).

Используется для отметки используемых операций, после анализа возможности выполнения операции (учет БЗУ, загруженность КА и т.д.);

з) код КА / ППИ куда переданы данные (если передача данных невозможна, то равно 0);

и) время начала и окончания передачи данных на следующий этап (если передача данных невозможна, то равно 0);

к) идентификационные номера заявок попавшие в маршрут съемки.

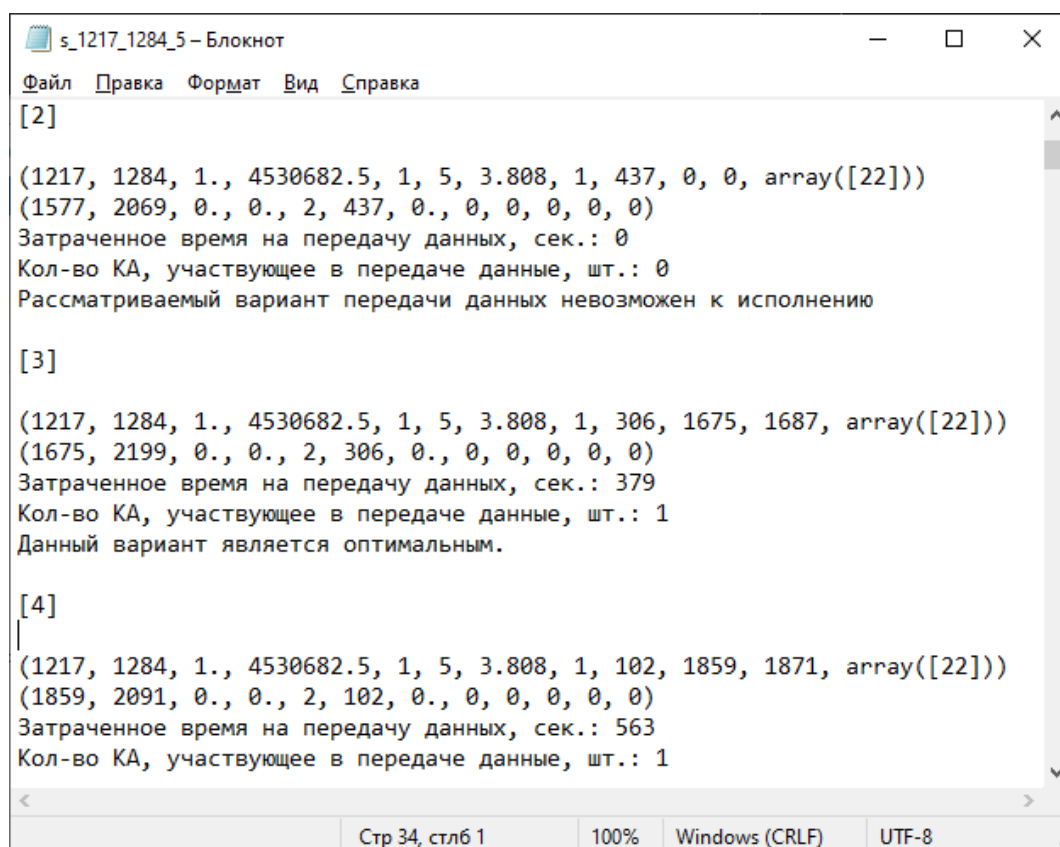
3) перечень операций межспутниковой передачи данных (количество операций может быть как 0, в случае отсутствия межспутниковой передачи данных, так и N, где N не может быть больше суммарного количества КА участвующего в расчете), пример представлен на рисунке 3.6. Параметры операции, записанные в файл:

а) время начала и окончания нахождения в ЗРВ «КА-КА», в секундах от момента начала планирования;

б) угол визирования (по умолчанию равен 0, угол визирования при осуществлении межспутниковой связи не рассматривается в рамках данной модели);

в) условная стоимость операции (по умолчанию равен 0, условная стоимость отдельной операции передачи ЦИ по МЛС не рассчитывается в рамках данной модели);

- г) идентификационный номер типа операции;
 - д) код промежуточного КА куда передана ЦИ при помощи МЛС;
 - е) далее содержатся столбцы с нулевыми данными для соответствия размерности матрицы (данные будут обновлены в итоговом списке операций).
- 4) параметры передачи данных на Землю для рассматриваемого варианта. Перечень параметров идентичен описанию операций межспутниковой передачи данных, за исключением своего идентификационного номера операции и вместо кода промежуточного КА используется код рассматриваемого ППИ;
- 5) далее каждый возможный вариант передачи оценивается по длительности, количеству КА участвующих в операции, а также возможности ее выполнения.



```

s_1217_1284_5 – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
[2]
(1217, 1284, 1., 4530682.5, 1, 5, 3.808, 1, 437, 0, 0, array([22]))
(1577, 2069, 0., 0., 2, 437, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
Затраченное время на передачу данных, сек.: 0
Кол-во КА, участвующее в передаче данные, шт.: 0
Рассматриваемый вариант передачи данных невозможен к исполнению

[3]
(1217, 1284, 1., 4530682.5, 1, 5, 3.808, 1, 306, 1675, 1687, array([22]))
(1675, 2199, 0., 0., 2, 306, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
Затраченное время на передачу данных, сек.: 379
Кол-во КА, участвующее в передаче данные, шт.: 1
Данный вариант является оптимальным.

[4]
(1217, 1284, 1., 4530682.5, 1, 5, 3.808, 1, 102, 1859, 1871, array([22]))
(1859, 2091, 0., 0., 2, 102, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
Затраченное время на передачу данных, сек.: 563
Кол-во КА, участвующее в передаче данные, шт.: 1
  
```

Рисунок 3.6 – Фрагмент результирующего текстового файла с вариантами маршрута передачи рассматриваемой съемки

– бинарные файлы, создаваемые по окончанию расчета:

- 1) «dropPPIKA_data.npy» - содержит N-мерный массив данных, соответствующий каждой возможной паре «КА-ППИ» со значениями

загруженности канала связи, значениями временных промежутков подготовки ПК к / после сеанса передачи данных, а также временные промежутки, когда сеанс был зарезервирован под выбранный КА, но фактического сброса не произошло;

2) «KA_BZU.npy» - содержит значения загруженности БЗУ для каждого КА на заданный промежуток времени;

3) «OPlan_resKAKA.npy» - содержит массив, состоящий из оптимизированного опорного плана работы каждого КА, соответствующий по формату с результирующим табличным файлом опорного плана работы КА;

4) «PPI_data.npy» - содержит массив со значениями загруженности ПК каждого ППИ на рассматриваемый промежуток времени;

5) «ZRV_KA_KA.npy» - содержит массив данных для каждой пары «КА-КА» со значениями загруженности линий связи, а также нахождения в ЗРВ для рассматриваемого промежутка времени;

6) «ZRV_KA_PPI.npy» - содержит N-мерный массив данных соответствующий каждой возможной паре «КА-ППИ» и значения нахождения КА в ЗРВ, а также параметр передачи данных на каждый момент времени в рассматриваемом промежутке времени.

– табличные файлы формата *.xlsx в каталоге «...result\OOPlanresKAKAPATH» для каждого КА в расчете, фрагмент приведен на рисунке 3.7, где в строке содержится описание каждой целевой операции, а в столбцах:

1) время начала операции, в количестве секунд с начала заданного промежутка времени для расчета;

2) время окончания операции, в количестве секунд с начала заданного промежутка времени для расчета;

3) значения угла визирования КА ДЗЗ, при котором происходит маршрут съемки, °;

4) условная стоимость целевой операции;

5) идентификационный номер типа целевой операции (1 – маршрут съемки, 2 – передачи данных с КА на ППИ, 4 – передача данных от начального КА ДЗЗ другому КА по межспутниковой связи, 5 – промежуточная передача данных на рассматриваемом КА с использованием межспутниковой связи);

6) идентификационный номер ЦА для операций съемки или код ППИ / код КА для операций передачи данных;

7) объем данных, соответствующий данной целевой операции, Гб. Для операций съемки – объем отснятых данных, для операций передачи данных – объем переданных данных;

8) параметр использования операции, где 1 – операция используется, а 0 – не используется;

9) параметр передачи данных – содержит значение кода ППИ, означающую передачу данных на ППИ (параметр заполняется только для операций съемки);

10) время начала передачи данных на ППИ / КА, в количестве секунд с начала заданного промежутка времени для расчета;

11) время окончания передачи данных на ППИ / КА, в количестве секунд с начала заданного промежутка времени для расчета;

12) перечень идентификационных номеров заявок, для возможности отслеживания выполнения заявок потребителей на съемку.

160	70000	70009	-1	1068875	1	6	4	1	102	81669	81682	[358 520]	
161	70044	70092	1	3537156	1	6	19.6	0	0	-1	-1	[520 361]	
162	70045	70092	1	10220205	1	5	2.688	1	102	81683	81691	[21 362 413 518 412]	
163	70127	70176	-1	12794787	1	6	20	0	0	-1	-1	[361 520 519 454]	
164	70128	70176	-1	8714881	1	5	2.744	1	102	81692	81701	[21 518 408]	
165	70263	70298	-1	4185259	1	6	14.4	0	0	-1	-1	[519]	
166	70264	70298	-1	4563353	1	5	1.96	0	0	-1	-1	[21]	
167	70380	70405	-1	5899615	1	5	1.456	1	102	81702	81706	[21]	

Рисунок 3.7 – Фрагмент результирующего табличного файла *.xlsx

Модуль «Анализ результатов» создает графические файлы результатов работы распределения ЦИ, а также составляет статистику по процентному соотношению переданных данных с каждого КА и системы в целом. Графические файлы формируются по результатам анализа созданных бинарных

файлов и записываются в каталог «result/pictures» в форматах *.png. Для демонстрации результатов формируются следующие графики:

- загруженность линии связи каждой пары «КА-ППИ» в расчете;
- загруженность БЗУ КА (объем информации, хранящейся на борту КА);
- загруженность ППИ (количество одновременно работающих ПК на ППИ);
- загруженность МЛС для каждой пары «КА-КА».

Визуальное представление графиков приведено в главе с экспериментальной отработкой.

Дополнительно нужно отметить, что также как в случае с СПО планирования съемки ДЗЗ, на работу СПО распределения ЦИ ДЗЗ накладывается техническое ограничение на наличие не менее двух логических ядер процессора.

На рисунке 3.8 представлена архитектура разработанного СПО распределения ЦИ ДЗЗ.

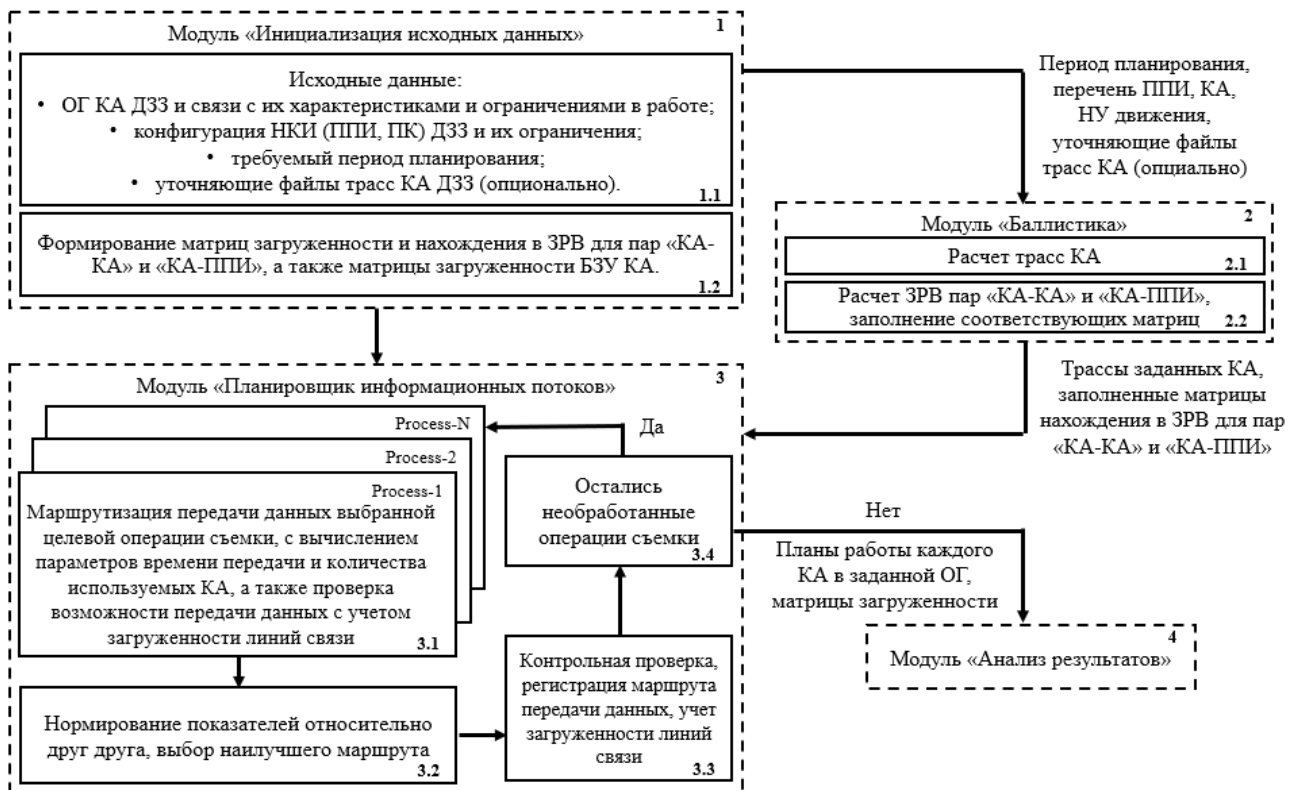


Рисунок 3.8 – Архитектура СПО распределения ЦИ ДЗЗ

На шаге 3.1 (рисунок 3.8) требуется рассмотреть всю заданную ОГ КА, при всех возможных вариантах маршрутизации передачи данных. Для дополнительного ускорения расчетов реализован вариант вложенной многопроцессорной обработки. Но в данном случае ОГ КА может состоять из N возможных КА и, чем больше N , тем существенно может быть увеличено количество возможных маршрутов передачи данных, требуемых к рассмотрению. Это, в свою очередь, является проблемой для длительности расчетов – для ее решения разработана и программно реализована двойная ступень обработки, рисунок 3.9.



Рисунок 3.9 – Схема вложенной многопроцессорной обработки

Использование данного решения позволяет обрабатывать от 1 и более возможных маршрутов передачи данных для разных КА ДЗЗ, что значительно уменьшает количество времени, требуемое для получения результата. Отличительной чертой подобной реализации является возможность ее масштабирования при наличии достаточных ресурсов. Пользователь может задать максимальное количество одновременно запускаемых процессов обработки.

После проведенного анализа возможности реализации различных маршрутов передачи данных происходит их оценка, где варианты реализованные с наименьшей длительностью передачи данных, а также наименьшим участием

других КА являются наилучшими. Для этого производится нормирование показателей относительно рассматриваемых маршрутов передачи данных между различными КА (первоначальным источником данных могут являться только КА ДЗЗ). Получение условных оценок маршрутов передачи ЦИ (данных) позволяет выбрать наилучший вариант, проверить возможность его выполнения и зарегистрировать его для учета загруженности линий связи и БЗУ всех КА, участвующих в его передаче. Для каждого маршрута съемки, сгенерированного КА ДЗЗ, может быть выбран только 1 маршрут его передачи на Землю. Далее рассматриваются варианты передачи других маршрутов съемки. Если, во время контрольной проверки будет выявлена перегруженность используемых каналов (проверка на возможное количество одновременного использования конкретного канала связи) связи или возможное переполнение БЗУ КА, то это приведет к перевыбору маршрута передачи. Если же все предложенные варианты маршрутов передачи ЦИ не могут быть выполнены – рассматриваемый маршрут съемки не может быть выполнен и отмечается соответствующим параметром.

3.4 Выводы по разделу

В разделе представлена методика и архитектура комплекса программ моделирования планирования съемки ДЗЗ и передачи ЦИ на Землю в автоматизированном режиме, позволяющий решать следующие задачи:

- формировать перечень возможных маршрутов съемки для каждого заданного КА ДЗЗ, в соответствии с заданными регионами интереса и учетом работы ЦА наблюдения;
- формировать план работы каждого КА ДЗЗ / КА связи системы для выполнения целевых задач ДЗЗ;
- формировать план работы НКИ для приема сгенерированной ЦИ;

- проводить оценку загруженности межспутниковых и наземно-космических каналов связи, отдельных КА и ППИ для выявления возможных проблем при использовании заданной конфигурации КС.

Предложен состав комплекса программ, состоящий из:

- БД для хранения конфигурации ИД;
- СПО планирования съемки ДЗЗ для формирования перечня возможных съемок (периодов включения ЦА съемки);
- СПО распределения ЦИ ДЗЗ для моделирования распределения ЦИ ДЗЗ между различным узлами КС с целью доставки ЦИ ДЗЗ от КА ДЗЗ на Землю и формирования опорного плана работы заданной ОГ КА, учитывая загруженность при выполнении передачи ЦИ.

Предложена архитектура работы СПО для масштабируемого роста мощности вычислений в зависимости от используемых технических характеристик АРМ моделирования.

4 Основные результаты экспериментальной отработки методик формирования опорного плана и ретрансляции целевой информации в условиях высокой плотности объектов наблюдения

Целью экспериментальной отработки являлась демонстрация возможностей предлагаемого подхода связанного с использованием в системе ДЗЗ каналов межспутниковой связи для распределения потоков ЦИ, а также автоматического планирования разноплановых КА ДЗЗ в объединенной ОГ КА ДЗЗ при функционировании КС ДЗЗ.

Экспериментальная отработка проводится при различной конфигурации наличия межспутниковой связи, ОГ КА и состоит из 9 вариантов:

- 1) ОГ из 6 КА ДЗЗ, традиционный вариант распределения ЦИ (без межспутниковой связи);
- 2) ОГ из 6 КА ДЗЗ с межспутниковой связью, но без возможности хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА («промежуточным» КА считается тот, который участвует в передаче ЦИ от первоначального КА ДЗЗ до конечного пункта назначения, передача ЦИ осуществляется методом ретрансляции данных);
- 3) ОГ из 6 КА ДЗЗ с межспутниковой связью и возможностью хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА;
- 4) ОГ из 12 КА ДЗЗ, традиционный вариант распределения ЦИ;
- 5) ОГ из 12 КА ДЗЗ с межспутниковой связью, но без возможности хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА;
- 6) ОГ из 12 КА ДЗЗ с межспутниковой связью и возможностью хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных КА»;
- 7) ОГ из 18 КА ДЗЗ, традиционный вариант распределения ЦИ;
- 8) ОГ из 18 КА ДЗЗ с межспутниковой связью, но без возможности хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА;
- 9) ОГ из 18 КА ДЗЗ с межспутниковой связью и возможностью хранения ЦИ в БЗУ «промежуточных КА».

4.1 Исходные данные

В качестве исходных данных использованы структурированные массивы, записанные в БД и текстовый файл параметров с разрешением *.ini. Структура исходных данных разделена на:

- данные о заявках потребителей, с заданными регионами интереса;
- данные о рассматриваемой ОГ КА ДЗЗ;
- данные о рассматриваемой НКИ КА ДЗЗ;
- данные о возможных маршрутах передачи данных.

Для расчетов используется 3 варианта ОГ КА ДЗЗ, где в основу каждого КА ДЗЗ легли характеристики КА типа «Канопус» для стандартизации расчетов:

- 6 КА (близок к существующей ОГ КА ДЗЗ типа «Канопус», с учетом вышедшего из штатной эксплуатации КА «Канопус-В №1»);
- 12 КА, равномерно распределенных в двух ОП;
- 18 КА, равномерно распределенных в трех ОП.

Дополнительно нужно отметить, что в предложенной модели есть возможность создать любой тип КА (путем описания состава ЦА и характеристик), но для экспериментальной отработки был взят КА типа «Канопус», имеющий достаточное количество информации о своих характеристиках в открытых источниках информации.

Для расчетов каждому КА назначен свой индивидуальный условный код КА. В таблице 4.1 указаны параметры [104], используемые для расчета трасс КА варианта 1.

Таблица 4.1 – Начальные условия ОГ КА ДЗЗ, состоящей из 6 КА

№	Название	Код КА	Строки TLE
1.	Канопус-В №1	3100	1 38707U 12039A 23201.78322061 .00017242 00000-0 58089-3 0 9996 2 38707 97.4779 128.4804 0002446 106.7339 253.4170 15.30813638610111
2.	Канопус-В-ИК	3101	1 42825U 17042A 23202.78623514 .00003355 00000-0 15192-3 0 9997 2 42825 97.4118 110.4794 0001816 94.0147 266.1296 15.21564969333863

3.	Канопус-В №3	3102	1 43180U 18014A 23202.77280112 .00003680 00000-0 16640-3 0 9994 2 43180 97.4118 110.4588 0001894 87.0286 273.1167 15.21545104303212
4.	Канопус-В №4	3103	1 43181U 18014B 23202.74662163 .00003930 00000-0 17751-3 0 9994 2 43181 97.4120 110.4866 0001949 93.6880 266.4579 15.21545152303225
5.	Канопус-В №5	3104	1 43876U 18111A 23202.76021455 .00003805 00000-0 17191-3 0 9997 2 43876 97.4117 110.4318 0001905 93.0711 267.0743 15.21552327251238
6.	Канопус-В №6	3105	1 43877U 18111B 23202.73409312 .00003631 00000-0 16407-3 0 9993 2 43877 97.4118 110.4181 0001959 90.5186 269.6275 15.21578924251223

Для других вариантов каждый КА будет отличаться условным номером и набором начальных условий. Для каждой орбитальной плоскости задана индивидуальная высота перигея для теоретического предотвращения столкновений КА между собой. В каждой ОП располагается 6 равномерно распределенных КА, таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Начальные условия космического сегмента вариантов 12 и 18 КА

№	Код КА	Высота перигея, км	Эксцентриситет	Аргумент широты, град.	Аргумент перигея, град.	Наклонение, град.	ДВУ, град.
Вариант 12 КА							
1.	3100	510	0,0002	33	93	97	110
2.	3101	510	0,0002	93	93	97	110
3.	3102	510	0,0002	153	93	97	110
4.	3103	510	0,0002	213	93	97	110
5.	3104	510	0,0002	273	93	97	110
6.	3105	510	0,0002	333	93	97	110
7.	3106	530	0,0002	33	93	97	200
8.	3107	530	0,0002	93	93	97	200
9.	3108	530	0,0002	153	93	97	200
10.	3109	530	0,0002	213	93	97	200
11.	3110	530	0,0002	273	93	97	200
12.	3111	530	0,0002	333	93	97	200
Вариант 18 КА							
1.	3100	510	0,0002	33	93	97	110
2.	3101	510	0,0002	93	93	97	110
3.	3102	510	0,0002	153	93	97	110
4.	3103	510	0,0002	213	93	97	110

5.	3104	510	0,0002	273	93	97	110
6.	3105	510	0,0002	333	93	97	110
7.	3106	530	0,0002	33	93	97	170
8.	3107	530	0,0002	93	93	97	170
9.	3108	530	0,0002	153	93	97	170
10.	3109	530	0,0002	213	93	97	170
11.	3110	530	0,0002	273	93	97	170
12.	3111	530	0,0002	333	93	97	170
13.	3112	490	0,0002	33	93	97	230
14.	3113	490	0,0002	93	93	97	230
15.	3114	490	0,0002	153	93	97	230
16.	3115	490	0,0002	213	93	97	230
17.	3116	490	0,0002	273	93	97	230
18.	3117	490	0,0002	333	93	97	230

Визуальное представление орбитального построения варианта с 12 КА изображено на рисунке 4.1. Для варианта с 18 КА визуальное представление продемонстрировано на рисунке 4.2. Орбиты КА каждой ОП отображены индивидуальным цветом.

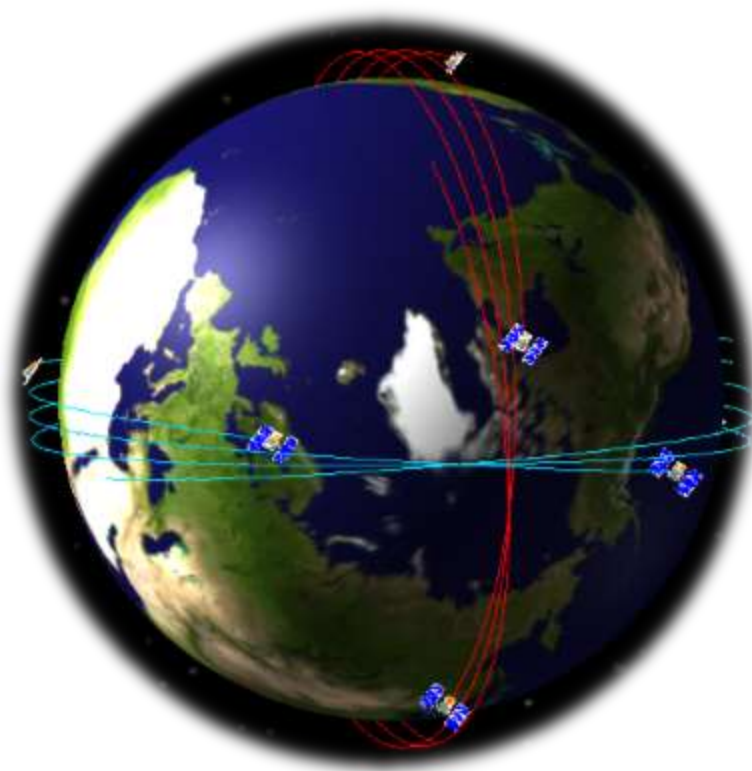


Рисунок 4.1 – Визуальное представление расположения 12 КА

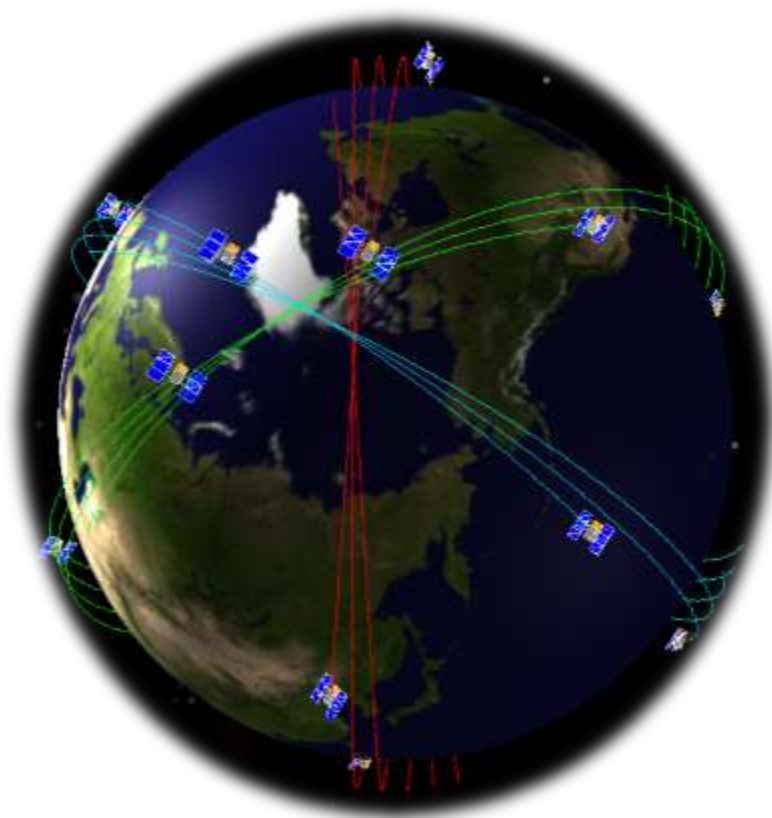


Рисунок 4.2 – Визуальное представление расположения 18 КА

Заданный интервал планирования равен одним суткам. Все КА в расчете являются типовыми и имеют характеристики, предоставленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для работы КА

№	Параметр	Значение
Параметры КА		
1.	Емкость БЗУ, Гб	192
2.	ЦА на борту	ПСС, МСС
3.	Скорость ВРЛ межспутниковой связи, Мб/с	1000
4.	Время до подготовки данных к передаче, с	24
5.	Скорость ВРЛ наземно-космической связи, Мб/с	300
Параметр высоты атмосферы		
6.	Высота атмосферы, км	300

При расчете ЗРВ для МЛС используется высота атмосферы, в которой помехи могут повлиять на излишние ошибки в данных, в 300 км. Межспутниковое взаимодействие, исходя из заданных условий орбиты ОГ КА

возможно только между «соседними» КА. При этом, СПО позволяет добавить дополнительно спутники связи, которые могут быть использованы исключительно на передачи данных в парах «КА-КА» и «КА-ПК», независимо от орбиты.

В качестве исходных данных по характеристиками работы ЦА наблюдения использованы данные существующих ЦА – ПСС и МСС (устанавливаются на КА ДЗЗ типа «Канопус-В»). Для настоящей модели разность характеристик ЦА наблюдения влияет на загруженность линий связи из-за возможности создания большего информационного потока, в качестве увеличения нагрузки возможно задать ЦА наблюдения с сверхвысоким разрешением (например, от КА ДЗЗ типа «Ресурс-ПМ»). Используемые характеристики работы ЦА наблюдения представлены в таблице 4.4 [105].

Таблица 4.4 – Характеристики ЦА наблюдения используемые в экспериментальной отработке

№	Характеристика	Значение
МСС		
1.	Тип ЦА	МСС
2.	Разрешение, м	12
3.	Возможность совместной работы с другими ЦА	✓
4.	Статус	✓
5.	Угловое поле зрения, град.	2.2
6.	Минимальное время работы ЦА, сек.	1
7.	Максимальное время работы ЦА, сек.	100
8.	Минимальное время между включениями ЦА, сек.	26
9.	Расход БЗУ во время работы ЦА, Гбит/сек	0.056
ПСС		
1.	Тип ЦА	ПСС
2.	Разрешение, м	2.5
3.	Возможность совместной работы с другими ЦА	✓
4.	Статус	✓
5.	Угловое поле зрения, град.	2.6
6.	Минимальное время работы ЦА, сек.	1
7.	Максимальное время работы ЦА, сек.	100
8.	Минимальное время между включениями ЦА, сек.	26
9.	Расход БЗУ во время работы ЦА, Гбит/сек	0.4

Установка ЦА наблюдения на каждый отдельный КА может быть выполнена под углом, относительно осей КА. В данной отработке все ЦА

наблюдения установлены без отклонения для всех КА (данный параметр влияет на видимость той или иной зоны Земной поверхности).

В качестве заявок заданы 2578 регионов, где каждой заявке соответствует 1 регион. Все регионы являются площадными и заданы распределенным по всей территории Земли, как с наличием перекрытий между ними, так и без их отсутствия. Заданные регионы являются выпуклыми многоугольниками и содержат не менее 3 вершин, визуально представлены на рисунке 4.3.

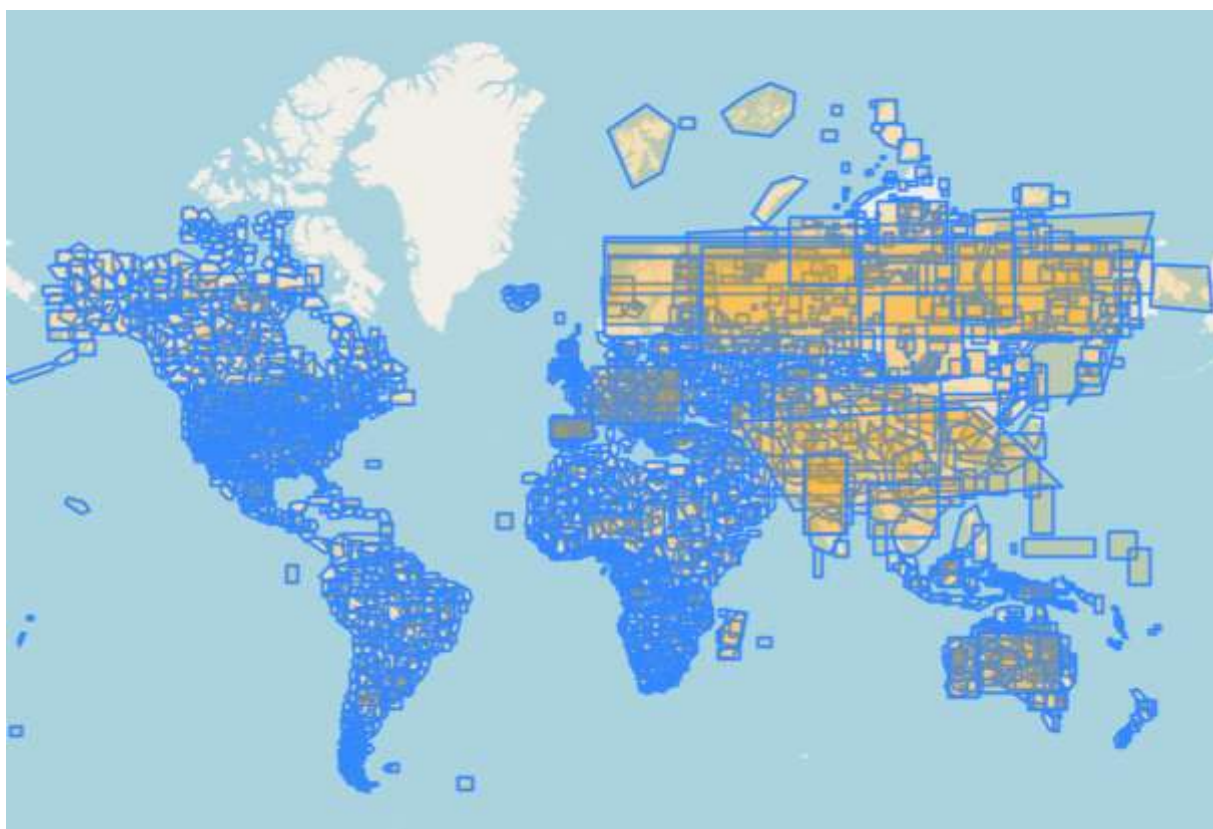


Рисунок 4.3 – Расположение регионов, соответствующих требуемым к съемке заявкам

В качестве потребителя в системе создан один, тестовый потребитель с приоритетом равным 1. Все заявки относятся к созданному потребителю и также имеют одинаковый приоритет, а также характеризуются:

- требованиями по разрешению, соответствующие заданным ЦА в соотношении 0.5:0.5;
- соответствующим временным интервалом равным или перекрывающим рассматриваемый интервал планирования ОГ КА ДЗЗ;

- координатами вершин заданных полигонов;
- максимальным углом отклонения для съемки, равным 10 град.;
- максимальным процентом облачности, равным 70 %;
- минимальным углом солнца, равным 20 град.

В качестве НКИ для приема ЦИ рассматривается существующая, в настоящий момент времени, система ЕТРИС ДЗЗ. Система ЕТРИС ДЗЗ характеризуется разрозненной сетью пунктов приема и обработки информации. В настоящей модели пункт (ППИ) выполняет функцию приема и дальнейшего хранения данных, а дальнейшая обработка информации не рассматривается. Каждый ППИ содержит от 1 до N ПК, при этом каждый ПК является универсальным и характеризуется следующими параметрами:

- может осуществлять работу с каждым КА в системе;
- скорость передачи данных составляет 300 Мб/с;
- продолжительность подготовки до и после сеанса приема (работы с КА) составляет 180 с;
- взаимодействие возможно с любым КА для приема ЦИ ДЗЗ.

Данные ППИ представлены в таблице 4.5, а расположение представлено на рисунке 4.4. ППИ в системе ЕТРИС имеют название НКПОР.

Таблица 4.5 – Данные ППИ

№	Наименование	Код ППИ	Местоположение используемые в расчете, координаты, град.	Количество ПК в расчете, шт.
1.	Оператор КС ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (НЦ ОМЗ, АО «Российские космические системы», г. Москва) НКПОР-О	100	Широта: 55.8597; Долгота: 37.625.	5
2.	Сибирский региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (г. Железногорск, Красноярский край, АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева») НКПОР-Р/К	101	Широта: 56.25; Долгота: 93.5333.	2
3.	Восточный региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (космодром «Восточный», г. Циолковский) НКПОР-Р/В	102	Широта: 51.7624; Долгота: 128.122.	2

4.	Западный региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (Балтийский КИП, АО «ОКБ «Факел», г. Калининград) НКПОР-Р/З	103	Широта: 54.7115; Долгота: 20.5048.	1
5.	Поволжский региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (ЦПОИ АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара) НКПОР-Р/ПВ	104	Широта: 53.215; Долгота: 50.2972.	1
6.	Северо-западный региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (Главное управление МЧС России по Мурманской области, г. Мурманск) НКПОР-Р/СЗ	105	Широта: 68.9533; Долгота: 33.1038.	2
7.	Северный региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (Главное управление МЧС России по Красноярскому краю, г. Дудинка) НКПОР-Р/СВ	106	Широта: 69.4055; Долгота: 86.1769.	1
8.	Антарктический региональный центр ДЗЗ Госкорпорации «Роскосмос» (российская антарктическая станция «Прогресс») НКПОР-Р/А	107	Широта: 69.38; Долгота: 76.38.	1
9.	Наземный комплекс приема и ретрансляции информации ДЗЗ на территории Республики Куба. Центры ФБГУ «НИЦ «Планета» НКП-Р-Т	108	Широта: 23.124; Долгота: 82.385.	-
10.	Европейский центр ФГБУ «НИЦ «Планета» (г. Москва) с филиалами в гг. Обнинск, Долгопрудный НКПОР-Е	109	Широта: 55.1122; Долгота: 36.6061.	2
11.	Сибирский региональный центр приема и обработки спутниковых данных г. Новосибирск НКПОР-Р/С	110	Широта: 55.0398; Долгота: 82.9272.	2
12.	Дальневосточный региональный центр приема и обработки спутниковых данных г. Хабаровск	111	Широта: 48.4771; Долгота: 135.095.	2



Рисунок 4.4 – Расположение пунктов ППИ [106-108]

4.2 Экспериментальная отработка с анализом выходных данные модели

Экспериментальная отработка программного комплекса осуществляется путем отдельных расчетов на входящих в его состав СПО планирования съемки ДЗЗ и СПО распределения ЦИ ДЗЗ. При этом, поскольку, на этапе расчетов распределения ЦИ имеется возможность гибкой настройки линий связи между отдельными узлами, то расчеты возможных съемок были проведены только для отличающихся ОГ КА ДЗЗ (3 варианта: 6 КА, 12 КА и 18 КА).

Количество возможных маршрутов съемки, рассчитанное при помощи СПО планирования съемки ДЗЗ и без учета загруженности БЗУ КА, представлено в таблице 4.6 для всех моделируемых вариантов ОГ КА. На рисунке 4.5 представлен фрагмент карты (Южная Америка) с наложенными регионами интереса и моделируемыми маршрутами съемки (карта сформирована после расчета распределения ЦИ одного из вариантов с 6 КА).

Таблица 4.6 – Количество возможных маршрутов съемки для каждого КА

№	Код КА	Количество возможных маршрутов съемки, шт.
Вариант с 6 КА		
1.	3100	318
2.	3101	452
3.	3102	389
4.	3103	360
5.	3104	389
6.	3105	473
Вариант с 12 КА		
1.	3100	361
2.	3101	384
3.	3102	368
4.	3103	373
5.	3104	378
6.	3105	368
7.	3106	463
8.	3107	458
9.	3108	461
10.	3109	469
11.	3110	451
12.	3111	461
Вариант с 18 КА		
1.	3100	367
2.	3101	380
3.	3102	356
4.	3103	350
5.	3104	368
6.	3105	354
7.	3106	434
8.	3107	429
9.	3108	441
10.	3109	470
11.	3110	482
12.	3111	469
13.	3112	485
14.	3113	503
15.	3114	494
16.	3115	447
17.	3116	451
18.	3117	528



Рисунок 4.5 – Фрагмент карты (Южная Америка) с наложенными регионами интереса и маршрутами съемки моделируемых КА (обозначены разным цветом)

После расчета возможных съемок произведено моделирование передачи ЦИ от КА ДЗЗ до ППИ, исходя из заданных вариантов маршрутов передачи.

4.2.2 Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 6 КА

Традиционный вариант распределения ЦИ ДЗЗ предполагает отсутствие межспутниковых линий связи и сброс данных от КА ДЗЗ на ППИ только в моменты нахождения КА в ЗРВ ППИ.

Загруженность наземно-космических линий связи при данном варианте распределения потока ЦИ показана на рисунке 4.6. Кроме того, данный график можно использовать для экспериментальной проверки адекватности работы модели, позволяющей проконтролировать то, что в каждый момент времени по

наземно-космическим линиям связи передается не более одного набора данных, полученных в результате работы ЦА наблюдения.

График загрузки БЗУ каждого КА представлен на рисунке 4.7.

Загруженность каждого ППИ в отдельности представлена на рисунке 4.8, где 100% - одновременная работа всех доступных ПК на ППИ.

Количество возможных интервалов работы ЦА каждого КА по результатам проведенного моделирования, а также выбранных с учетом загрузки всей системы при распределении информационных потоков представлено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА наблюдения, с рассмотрением возможности дальнейшей передачи данных без использования МЛС

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА наблюдения, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА наблюдения, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	318	267	83.96
2.	3101	452	352	78.87
3.	3102	389	369	94.85
4.	3103	360	300	83.33
5.	3104	389	332	85.34
6.	3105	473	424	89.64
ИТОГО		2381	2056	85.84

Время работы ЦА и количество включений представлено в таблице 4.8, данные отображены по утвержденным интервалам работы.

Таблица 4.8 – Время работы и количество включений ЦА наблюдения

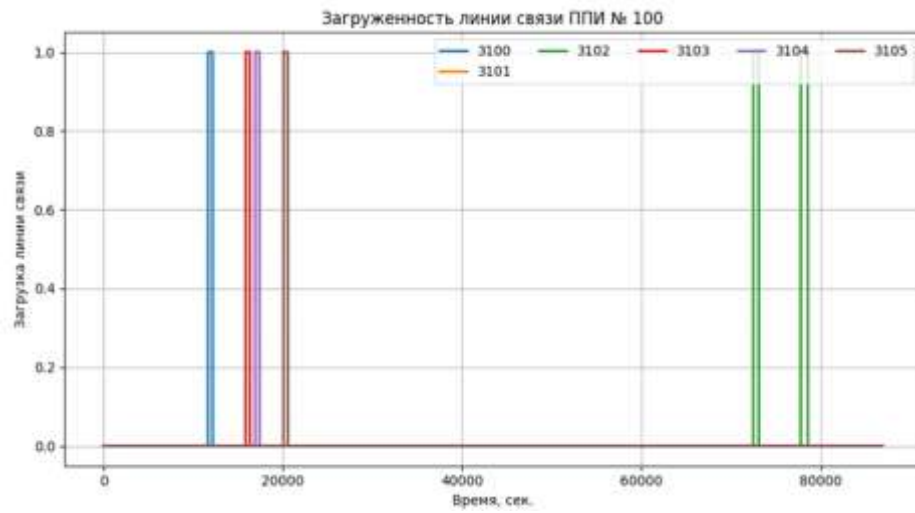
№	Код КА	Время работы ЦА наблюдения на период планирования, с		Количество включений ЦА наблюдения на период планирования, шт.	
		МСС	ПСС	МСС	ПСС
1.	3100	5035	4566	151	116
2.	3101	5387	4485	196	156
3.	3102	6407	5000	195	174
4.	3103	5582	5015	170	130
5.	3104	5396	4558	189	143
6.	3105	5595	4389	216	208

В таблице 4.9 содержится информация о среднем времени передачи ЦИ каждого КА при распределении информационного потока традиционным способом.

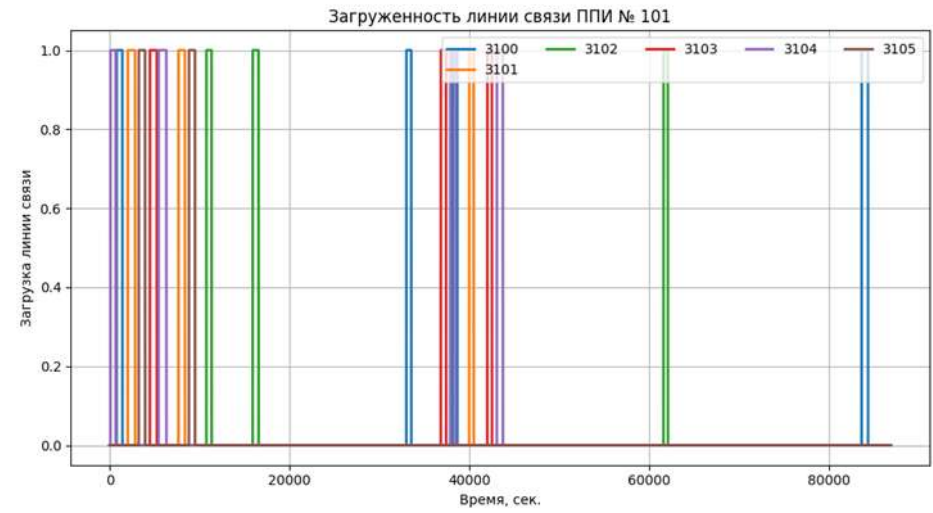
Таблица 4.9 – Среднее время передачи ЦИ, 6 КА, традиционный вариант распределения

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	2797.15
2.	3101	2429.75
3.	3102	1799.89
4.	3103	2648.88
5.	3104	3147.24
6.	3105	3652.13
Для всех КА		2745.67

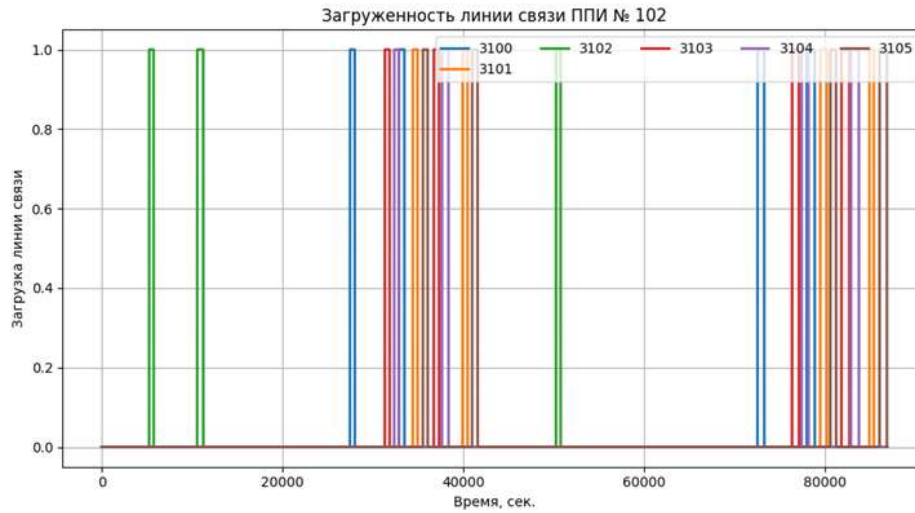
В таблицах 4.10 – 4.14 представлены объемы ЦИ, переданные с конкретного КА на конкретный ППИ, время, затраченное на фактическую передачу данных, количество сеансов, переданных маршрутов съемки, а также количество маршрутов и объемы данных оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования.



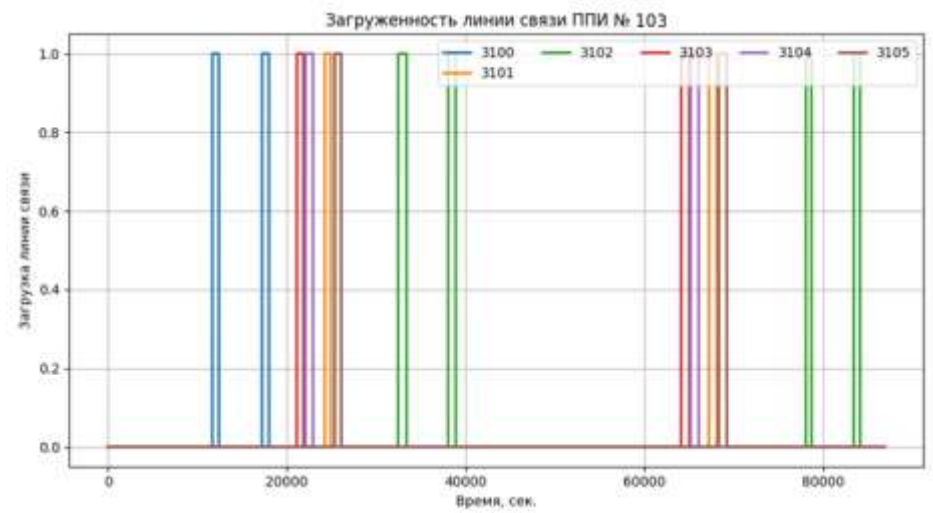
а)



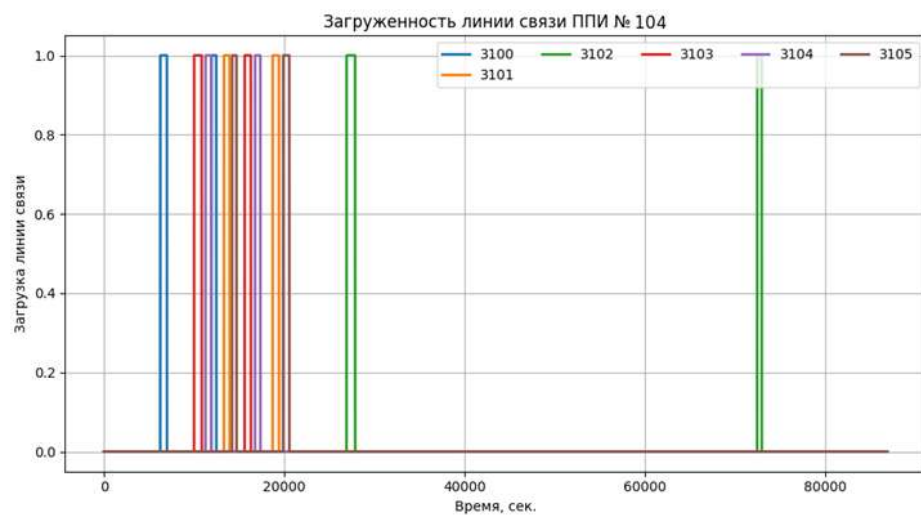
б)



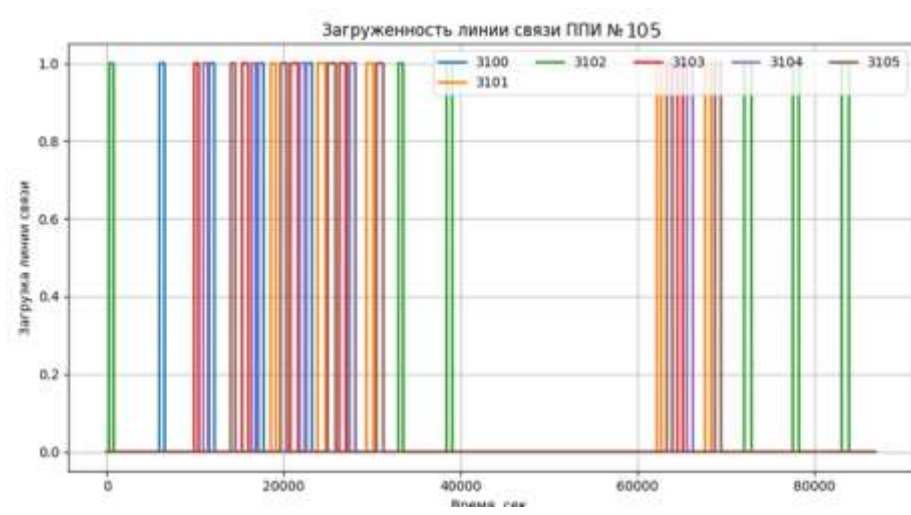
в)



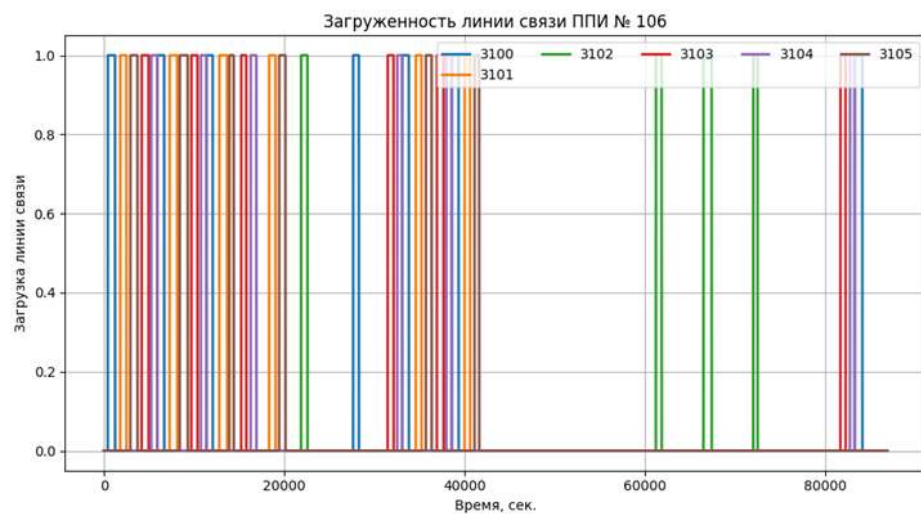
г)



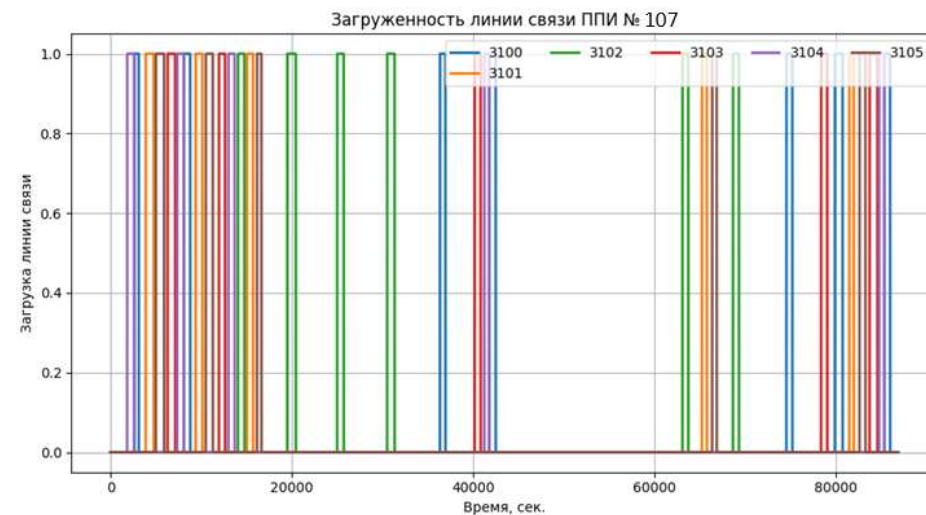
д)



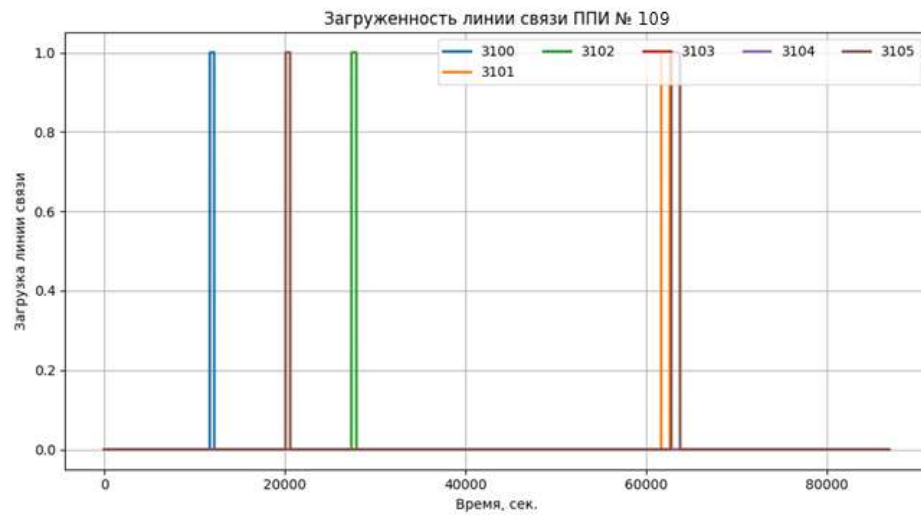
е)



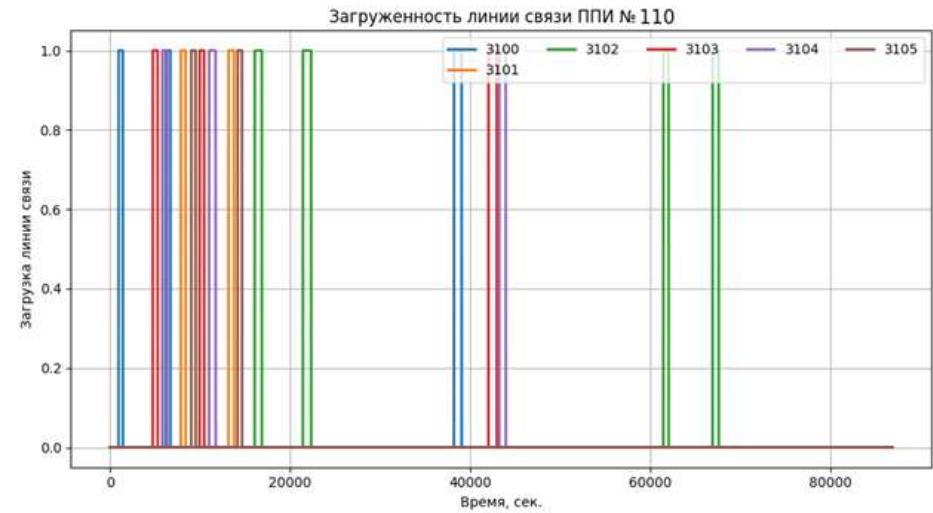
ж)



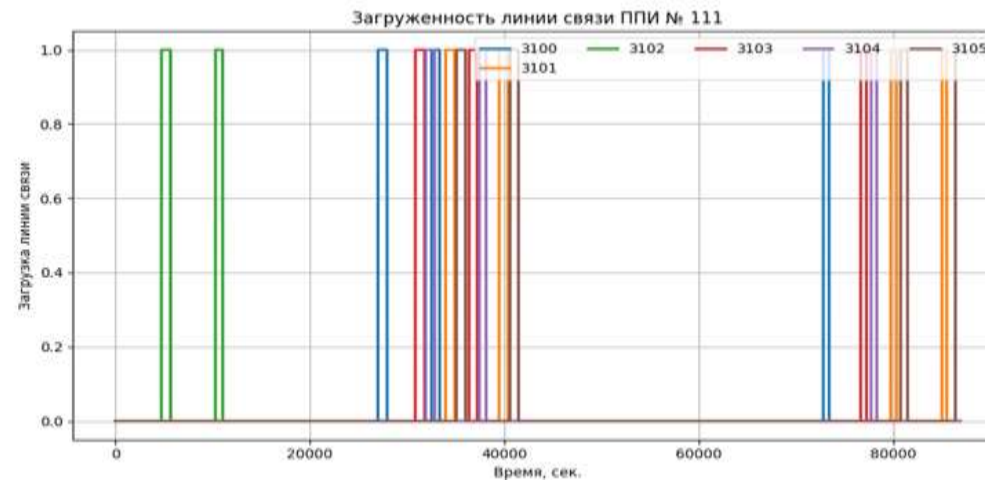
з)



и)



к)



л)

Рисунок 4.6 – График загруженности линий связи КА-ППИ, а) – ППИ № 100, б) – ППИ № 101, в) – ППИ № 102, г) – ППИ № 103, д) – ППИ № 104, е) – ППИ № 105, ж) – ППИ № 106, з) – ППИ № 107, и) – ППИ № 109, к) – ППИ № 110, л) – ППИ № 111

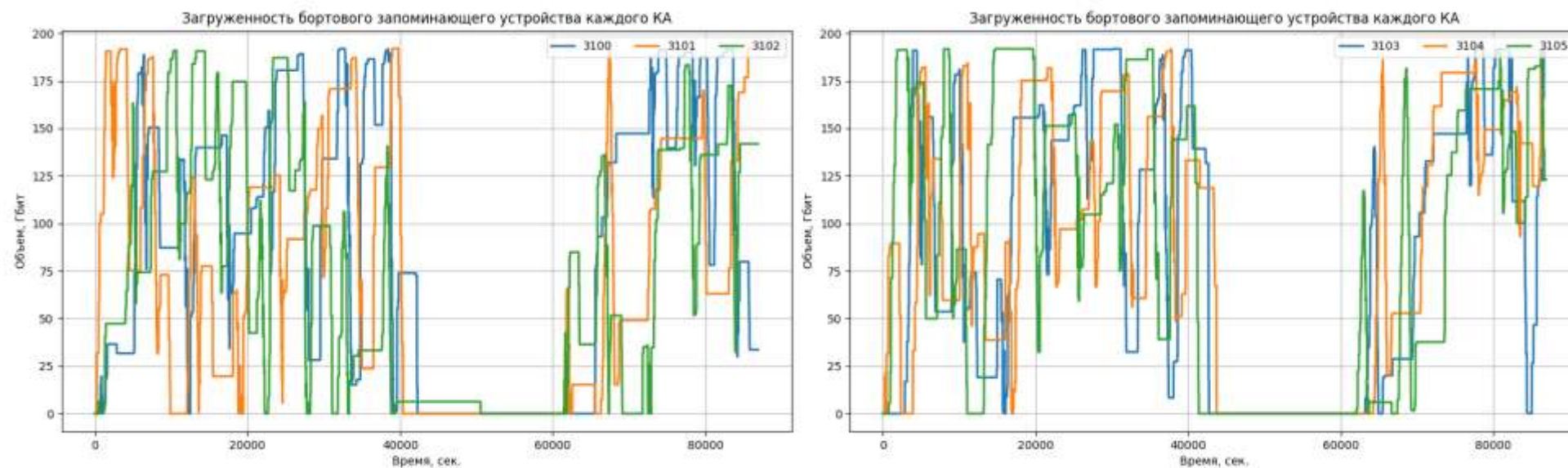


Рисунок 4.7 – График загрузки БЗУ КА

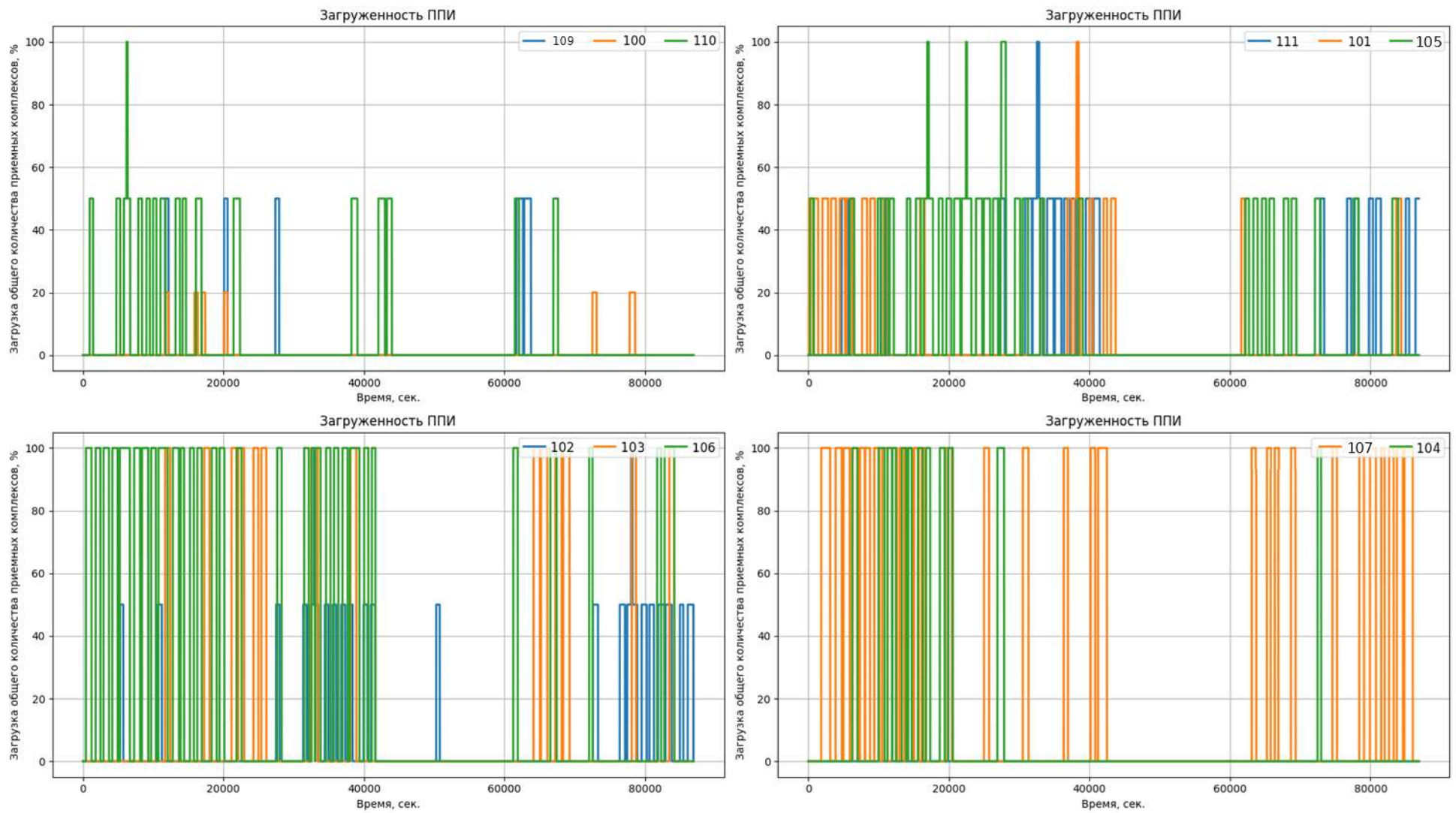


Рисунок 4.8 – График загруженности ПК каждого ППИ в процентном соотношении

Таблица 4.10 – Объемы ЦИ, переданные с конкретного КА на конкретный ППИ и оставшиеся в БЗУ на момент окончания периода моделирования, Гб

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	1.568	94.968	246.656	151.512	92.16	253.984	455.0958	383.8879	0.616	126.272	268.04	33.6
3101	0	168.744	113.128	161.52	60.312	274.576	427.288	262.632	93.808	52.248	289.456	191.96
3102	102.448	78.87199	65.024	337.4799	146.44	304.688	193.144	468.224	17.784	290.904	211.928	141.856
3103	1.008	121.624	238.384	195.36	153.92	284.72	322.6159	376.952	0	154.736	277.28	191.992
3104	1.288	218.464	285.856	231.112	65.336	296.272	202.192	256.832	0	155.224	220.816	191.984
3105	1.184	120.928	188.944	190.008	59.728	339.5759	329.2319	264.6479	144.672	0.952	305.832	123.216
Итого	107.496	803.6	1137.992	1266.992	577.896	1753.816	1929.568	2013.176	256.88	780.336	1573.352	874.608

Таблица 4.11 – Время, затраченное на фактическую передачу ЦИ с конкретного КА на конкретный ППИ, с

Код КА	Код ППИ											
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	6	472	831	515	310	857	1892	1308	3	423	910	
3101	0	571	384	629	366	984	1447	896	477	182	998	
3102	433	272	221	1166	492	1335	808	1594	60	1047	720	
3103	4	409	808	669	578	1004	1095	1295	0	518	932	
3104	5	768	970	785	266	1053	693	883	0	521	756	
3105	7	411	652	655	208	1274	1115	905	502	4	1054	
Итого	455	2903	3866	4419	2220	6507	7050	6881	1042	2695	5370	

Таблица 4.12 – Количество сеансов связи между конкретным КА и конкретным ППИ, шт.

Код КА	Код ППИ										
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111
3100	1	4	4	2	2	4	7	7	1	3	3
3101	0	3	4	2	2	5	6	5	1	2	4
3102	2	3	3	4	2	7	4	6	1	4	2
3103	1	3	4	2	2	5	6	5	0	3	3
3104	1	4	4	2	2	5	6	5	0	3	3
3105	1	2	4	2	2	6	6	5	2	2	4
Итого	6	19	23	14	12	32	35	33	5	17	19

Таблица 4.13 – Количество переданных маршрутов съемки с конкретного КА на конкретный ППИ и количество маршрутов съемки оставшихся в БЗУ КА на момент окончания периода моделирования, шт.

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	1	12	21	22	8	25	61	71	1	4	39	2
3101	0	20	19	26	20	50	49	49	20	13	65	21
3102	12	23	9	57	8	55	26	77	2	52	31	17
3103	1	10	33	35	10	38	45	82	0	7	28	11
3104	1	36	39	31	7	56	35	56	0	10	44	17
3105	5	21	49	45	18	81	35	52	40	2	61	15
Итого	20	122	170	216	71	305	251	387	63	88	268	83

Полученные результаты моделирования варианта с 6 КА, при использовании традиционного распределения ЦИ, демонстрируют:

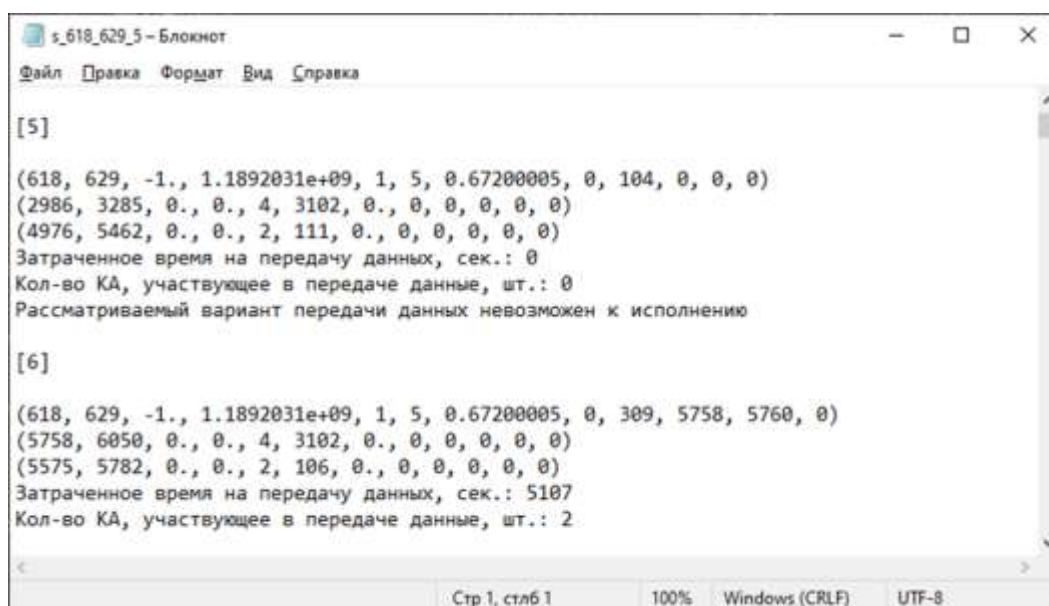
- равномерное распределение информационного потока по всем ППИ, а также комплексный учет выполненных съемок всеми КА заданной группировки, что подтверждает адекватность разработанной модели планирования работы КА и распределения ЦИ, полученной в результате работы КА;
- высокую загруженность каждого КА, исходя из большого количества заданных заявок, однако график загруженности БЗУ демонстрирует возможность использования БЗУ КА для хранения данных в промежуточном узле передачи данных. Исключением в загруженности работы ЦА наблюдения КА является невозможность выполнения заявок из-за низкого угла Солнца или высокой облачности региона интереса;
- заданная конфигурация НКИ является избыточной для моделируемой ОГ КА ДЗЗ (среднее значение загруженности линий связи КА-ППИ на период планирования $\sim 10.08\%$), что объясняется значительным количеством ППИ и территориальным распределением НКИ. Данный пункт также объясняет высокий процент реализации спланированных целевых операций съемки;
- отсутствие КА с возможностью выполнения всех спланированных операций объясняется недостаточной скоростью радиолинии между парой «КА-ППИ»;
- среднее время доставки данных выполненных маршрутов съемки на НКИ при заданной конфигурации составляет 2745.67 с и общим процентом выполнения возможных маршрутов съемки с учетом загруженности доступных линий связи и БЗУ каждого КА в 85.84%.

4.2.3 Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 6 КА

Моделирование варианта ОГ из 6 КА с возможностью ретрансляции по МЛС (без возможности хранения данных в БЗУ промежуточных КА) демонстрирует схожие с традиционным вариантом распределения результаты.

Близость результата объясняется заданным построением ОГ КА. Заданная ОГ построена на основе реальной ОГ КА ДЗЗ типа «Канопус», которая создана с целью обеспечения максимального покрытия земного покрова при усредненных параметрах угла Солнца и облачности, а также без учета наличия МЛС между парами «КА-КА» для передачи ЦИ.

На рисунке 4.9 продемонстрирован фрагмент промежуточного файла с найденным вариантом передачи ЦИ на Землю при использовании МЛС.



```

s_618_629_5 - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка

[5]

(618, 629, -1., 1.1892031e+09, 1, 5, 0.67200005, 0, 104, 0, 0, 0)
(2986, 3285, 0., 0., 4, 3102, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
(4976, 5462, 0., 0., 2, 111, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
Затраченное время на передачу данных, сек.: 0
Кол-во КА, участвующее в передаче данные, шт.: 0
Рассматриваемый вариант передачи данных невозможен к исполнению

[6]

(618, 629, -1., 1.1892031e+09, 1, 5, 0.67200005, 0, 309, 5758, 5760, 0)
(5758, 6050, 0., 0., 4, 3102, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
(5575, 5782, 0., 0., 2, 106, 0., 0, 0, 0, 0, 0)
Затраченное время на передачу данных, сек.: 5107
Кол-во КА, участвующее в передаче данные, шт.: 2
  
```

Рисунок 4.9 – Фрагмент промежуточного файла с найденным вариантом передачи ЦИ на Землю при использовании МЛС

Представленные варианты передачи, рисунок 4.9, характеризуются следующими параметрами:

- для варианта под номером «[5]» передача ЦИ при помощи ретрансляции невозможна ввиду отсутствия одновременных сеансов передачи ЦИ между парами «КА-КА» (временной интервал с 2986 по 3285 с от начала периода планирования), а также между «КА-ППИ» (временной интервал с 4976 по 5462 с от начала периода планирования);

- для варианта под номером «[6]» передача ЦИ может быть осуществлена, но этот вариант не является рациональным выбором, что было подтверждено работой алгоритма.

На рисунке 4.10 представлен наилучший вариант передачи рассмотренного маршрута съемки, где затраченное время на передачу ЦИ значительно ниже.

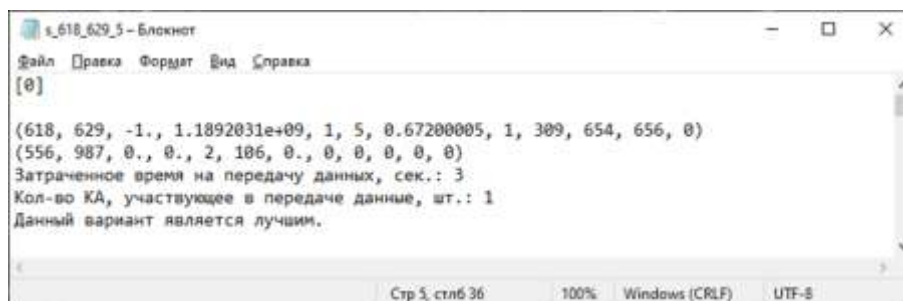
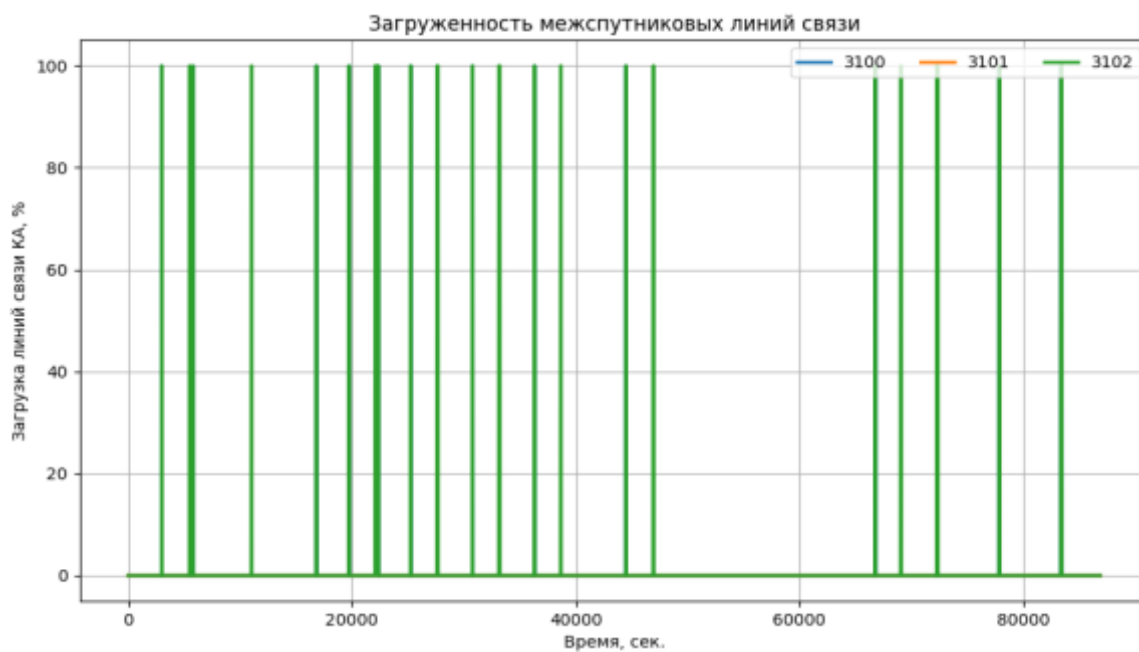


Рисунок 4.10 – Наилучший вариант передачи ЦИ

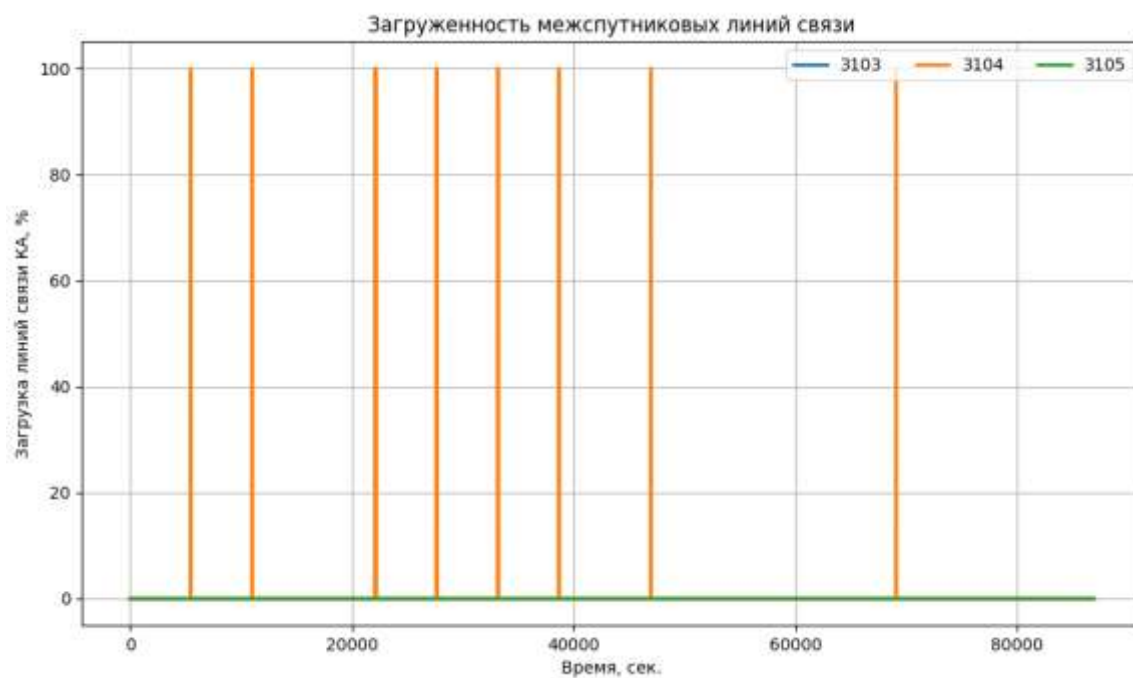
Использование МЛС предлагается лишь между двумя КА из моделируемой ОГ, рисунок 4.11. График загруженности МЛС показывает ее использование для каждого КА, который отправляет или принимает данных.

Загруженность МЛС на предоставленных графиках может принимать 2 значения – 0% или 100%, т.к. в исходных данных были заданы ограничения на 1 физический канал межспутниковой связи у каждого КА.

В таблицах 4.14 и 4.15 представлены данные результатов моделирования о суммарном итоге выбранных целевых операций работы ЦА наблюдения при рассмотрении возможности ретрансляционного распределения информационного потока, а также среднего времени доставки на НКИ соответственно.



а)



б)

Рисунок 4.11 – График загрузки МЛС, а) – для КА 3100 – 3102, б) для КА 3103 – 3105

Таблица 4.14 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА наблюдения, при возможности ретрансляционного распределения информационного потока в ОГ из 6 КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА наблюдения, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА наблюдения, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	318	279	87.73
2.	3101	452	352	77.87
3.	3102	389	365	93.83
4.	3103	360	300	83.33
5.	3104	389	341	87.66
6.	3105	473	424	89.64
ИТОГО		2381	2061	86.56

Таблица 4.15 – Среднее время передачи данных, 6 КА, ретрансляционное распределение

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	2575.71
2.	3101	2429.75
3.	3102	2102.89
4.	3103	2647.88
5.	3104	2645.93
6.	3105	3652.13
Для всех КА		2675.71

Анализируя полученные в ходе расчетов данные, а также сравнивая их с полученными результатами при традиционном распределении информационных потоков ЦИ можно сделать следующие выводы:

– орбитальное построение моделируемой группировки КА не позволяет получить достаточных временных промежутков для ретрансляционной передачи ЦИ между КА;

– малое количество временных промежутков нахождения пар КА в ЗРВ друг друга позволяет незначительно ускорить среднее время передачи данных при ретрансляционном распределении в ~ 1.026 раза и увеличивает общее количество выполненных маршрутов съемки на 0.72%, что демонстрирует

перспективу использования сетевой архитектуры в наиболее крупных группировках.

4.2.4 Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 6 КА

В отличие от результатов варианта с ретрансляцией при передаче ЦИ в настоящем варианте, даже при столь скудной по размерности группировке в результатах моделирования предлагается использовать МЛС для повышения оперативности доставки ЦИ на Землю.

Например, на рисунке 4.12 представлен фрагмент промежуточного файла с возможными вариантами передачи ЦИ от КА № 3100.

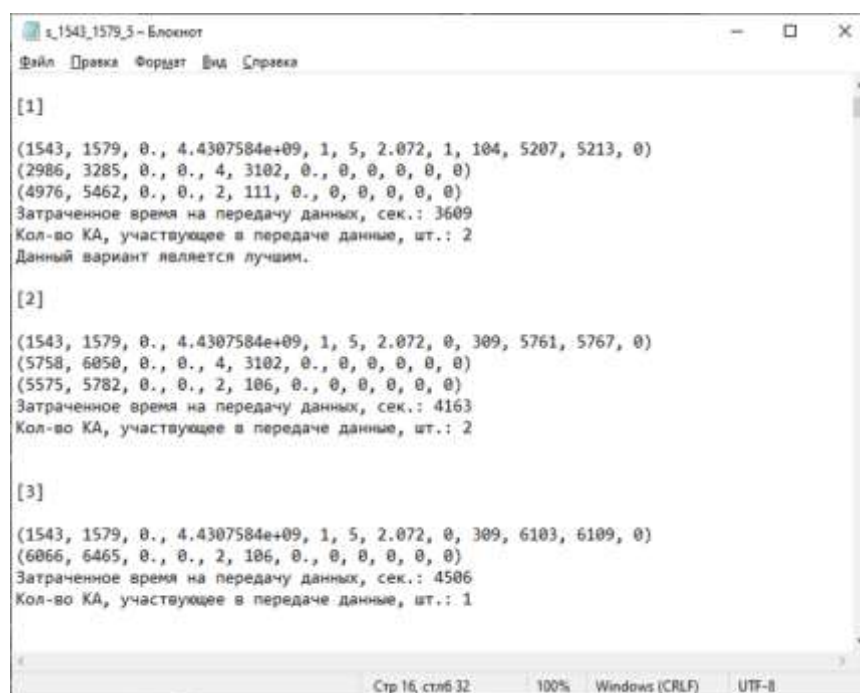


Рисунок 4.12 – Фрагмент промежуточного файла для КА № 3100

На представленном фрагменте есть 3 варианта передачи маршрута съемки:

1) вариант с использованием МЛС между КА № 3100 и КА № 3102, где КА № 3102 оказывается в ЗРВ одного из ППИ раньше, а также обладает необходимым информационным ресурсом для передачи данных;

2) вариант с использованием МЛС между аналогичной парой КА, но в следующий период попадания ЗРВ между парой «КА-КА». Временной

промежуток предлагаемой ЗРВ для межспутниковой связи, а также передачи данных с КА на ППИ происходит позже, что проигрывает предыдущему варианту;

3) вариант классической передачи данных от КА № 3100 сразу на ППИ № 309, в данном случае рассматриваемый вариант проигрывает предыдущим по времени из рассмотренных выше вариантов для передачи ЦИ.

На рисунках 4.13 - 4.15 представлены полученные при моделировании графики загруженности БЗУ каждого КА, каналов межспутниковой связи, а также загруженность ППИ.

В качестве результатов моделирования представлены таблицы 4.16 и 4.17, с данными о суммарном итоге целевых операций работы ЦА наблюдения при рассмотрении возможности распределения информационного потока в МЛС с записью в БЗУ промежуточного КА, а также среднего времени доставки данных на НКИ соответственно.

Таблица 4.16 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА наблюдения при возможности распределения информационного потока в МЛС с записью в БЗУ промежуточного КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА наблюдения, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА наблюдения, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	318	296	93.08
2.	3101	452	352	77.87
3.	3102	389	346	88.94
4.	3103	360	300	83.33
5.	3104	389	331	85.08
6.	3105	473	424	89.64
ИТОГО		2381	2049	86.05

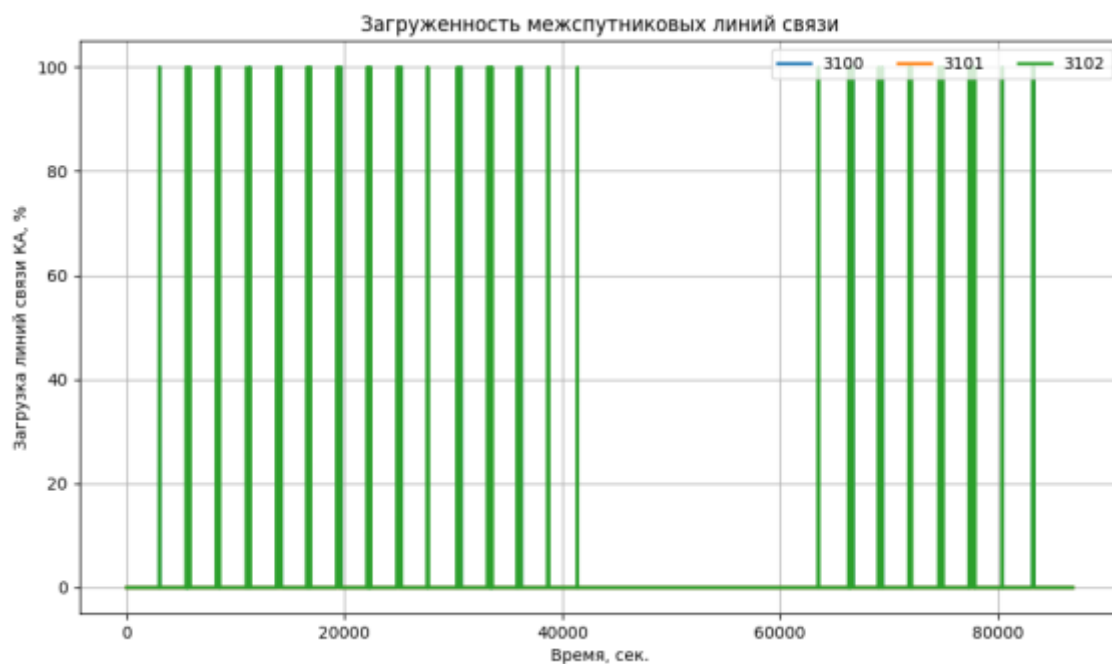


а)

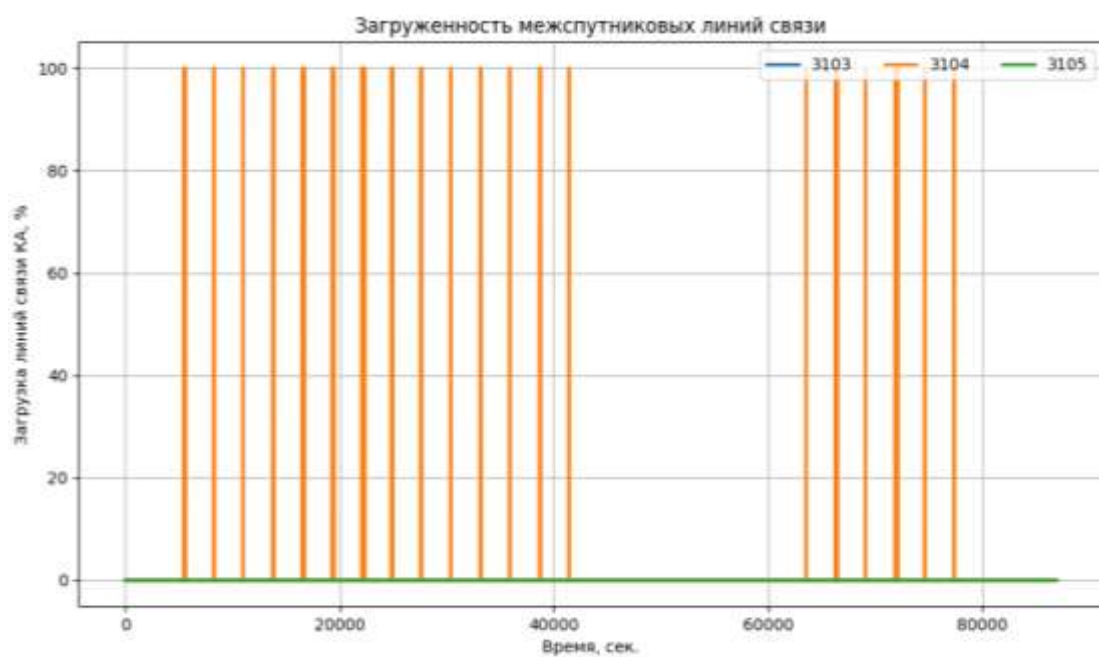


б)

Рисунок 4.13 – Загруженность БЗУ КА, а) – для КА № 3100, 3101, 3102,
б) – для КА № 3103, 3104, 3105



а)



б)

Рисунок 4.14 – Загруженность МЛС, а) – для КА № 3100, 3101, 3102,
б) – для КА № 3103, 3104, 3105

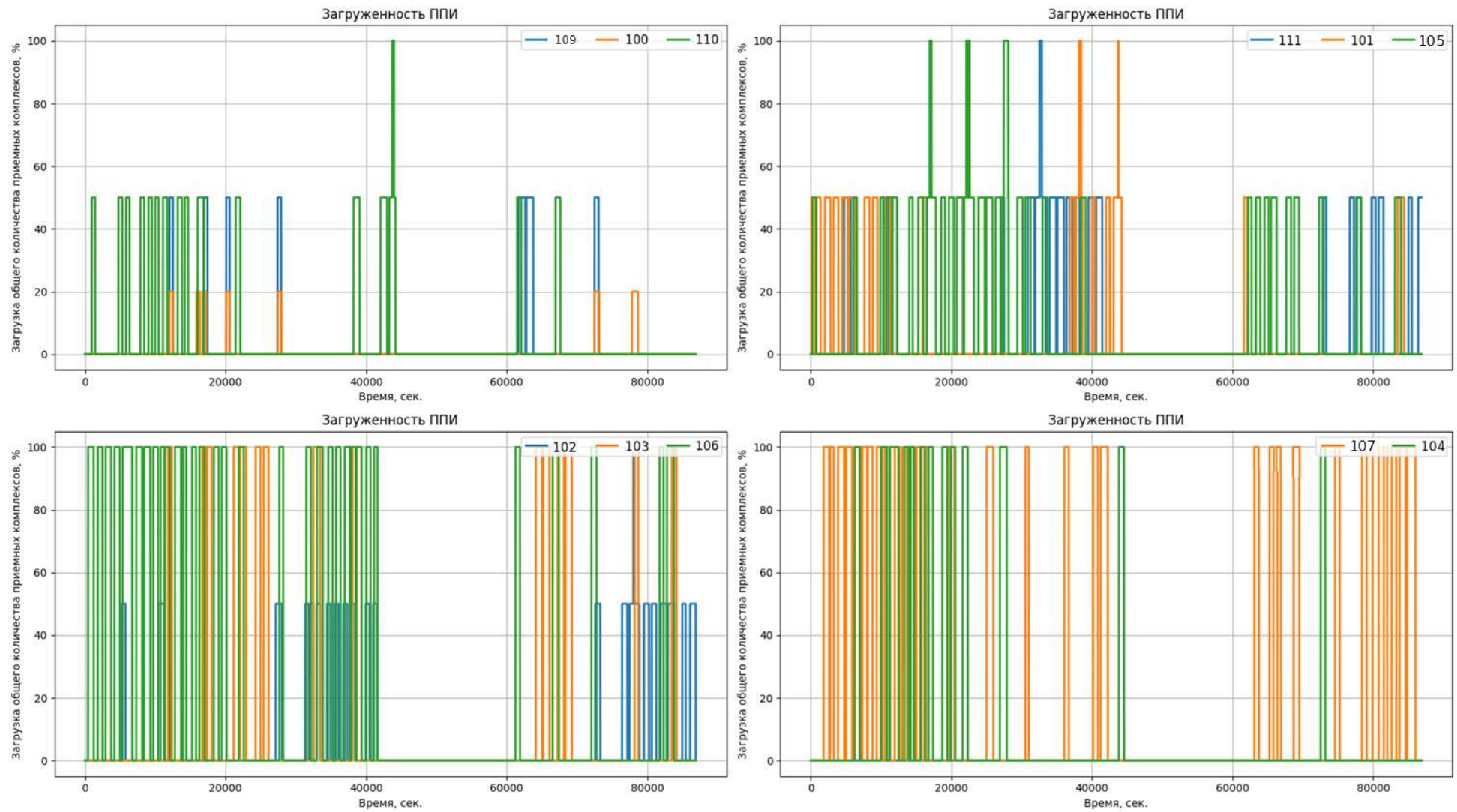


Рисунок 4.15 – Загруженность приемных средств ППИ

Таблица 4.17 – Среднее время передачи данных, 6 КА, вариант с МЛС и записью данных в БЗУ промежуточного КА

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	1468.72
2.	3101	2429.75
3.	3102	2667.61
4.	3103	2647.88
5.	3104	1824.83
6.	3105	3652.13
Для всех КА		2448.48

Полученные результаты демонстрируют:

- повышение оперативности доставки ЦИ на НКИ с использованием МЛС и возможностью записи данных в БЗУ КА в 1.12 раз по сравнению с традиционным вариантом, что подразумевает ~300 сек.

- общее количество выбранных к реализации маршрутов съемки (86.05%) повышается относительно традиционного варианта (85.84%) распределения целевой информации и немногим ниже, чем у ретрансляционного распределения (86.56%).

Проведенное моделирование с цифровым аналогом группировки КА ДЗЗ типа «Канопус-В» в различных вариантах распределения информационного потока позволяет сделать вывод о адекватности полученных результатов загруженности БЗУ и линий связи между узлами сети, а также показывает необходимость использования сетевых технологий для повышения оперативности доставки данных с КА на НКИ в перспективных группировках КА ДЗЗ.

4.2.5 Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 12 КА

В данном варианте изменяется не только количество КА (с 6 до 12), но и их расположение на орбите. КА расположены на 2 орбитальных плоскостях по 6

КА в каждой, расположение КА в одной орбитальной плоскости равномерно, что значительно повышает время межспутниковой радиовидимости.

Загруженность наземно-космических линий связи между каждым ППИ и каждым КА при традиционном варианте распределения ЦИ продемонстрирована на рисунке 4.16. Традиционный вариант распределения ЦИ не предусматривает возможность использования МЛС.

График загруженности БЗУ каждого КА представлен на рисунке 4.17.

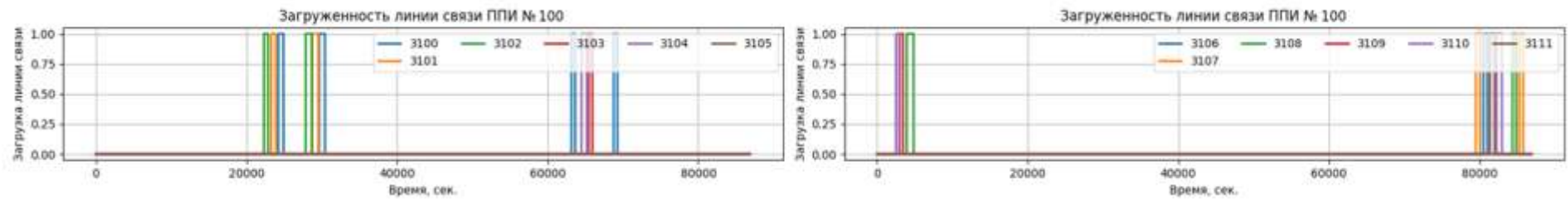
Загруженность каждого ППИ в отдельности представлена на рисунке 4.18, данные демонстрируют уровень загруженности, где 100% - одновременная работа всех доступных ПК на ППИ.

Количество возможных интервалов работы ЦА каждого КА по результатам проведенного моделирования, учитывая загруженность все системы при традиционном варианте распределения ЦИ представлено в таблице 4.18.

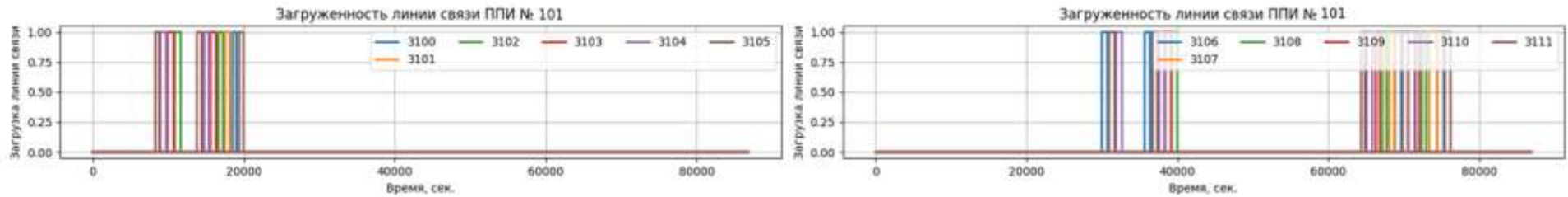
Таблица 4.18 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА, с учетом загруженности доступных линий связи при традиционном варианте распределения ЦИ

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	361	338	93.62
2.	3101	384	364	94.791
3.	3102	368	341	92.66
4.	3103	373	325	87.13
5.	3104	378	344	91.01
6.	3105	368	328	89.13
7.	3106	463	359	77.53
8.	3107	458	387	84.49
9.	3108	461	422	91.54
10.	3109	469	418	89.12
11.	3110	451	361	80.04
12.	3111	461	390	84.59
ИТОГО		4995	4377	87.62

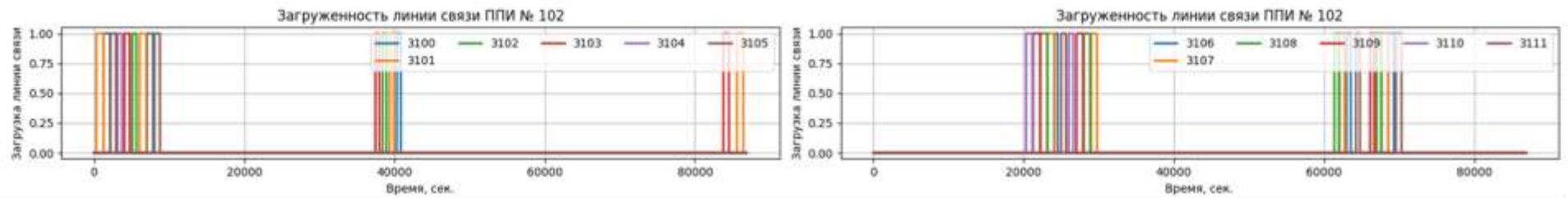
Время работы ЦА и количество включений представлено в таблице 4.19, данные отображены по выбранным в ходе моделирования целевым операциям.



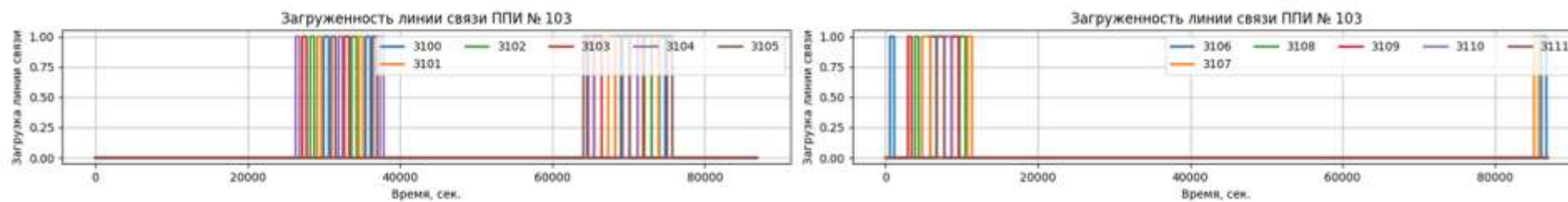
а)



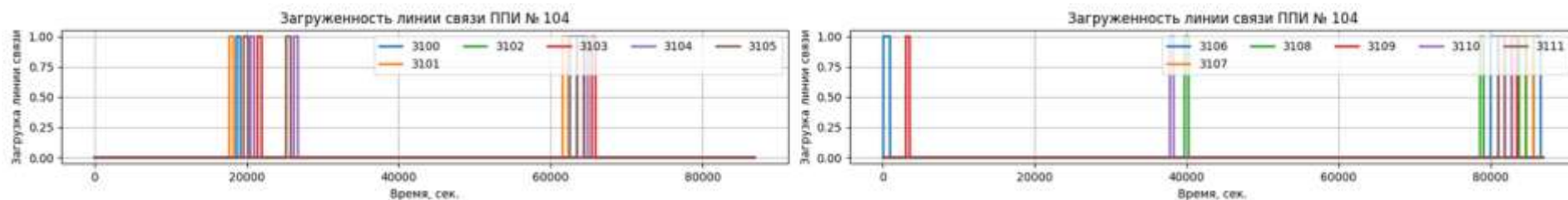
б)



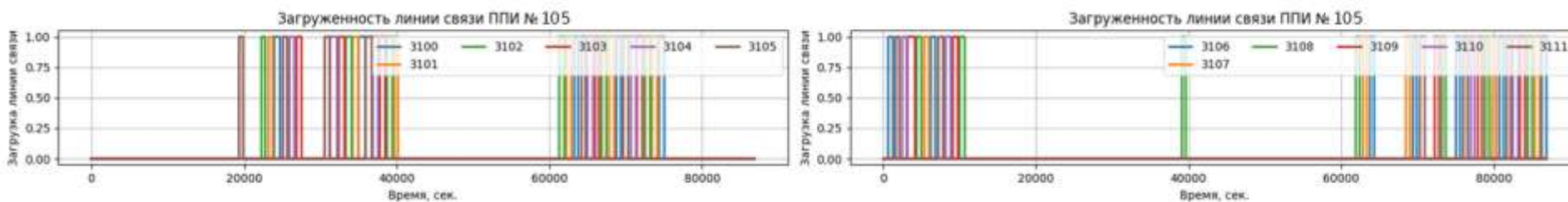
в)



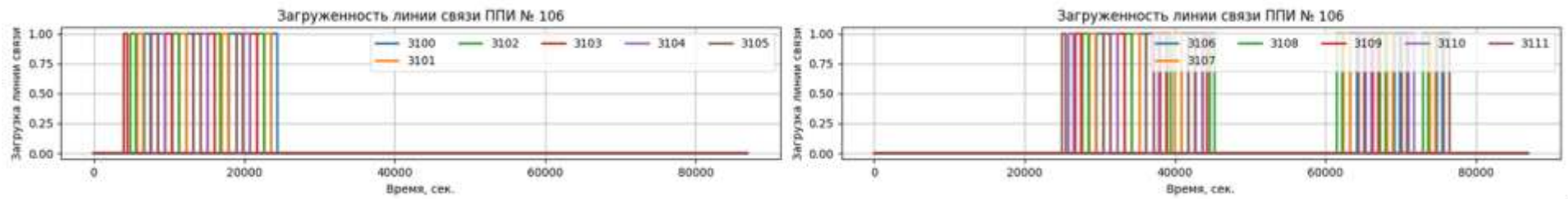
г)



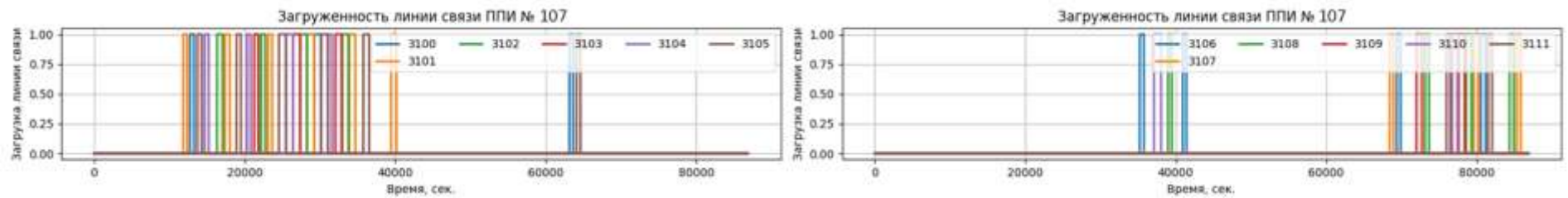
д)



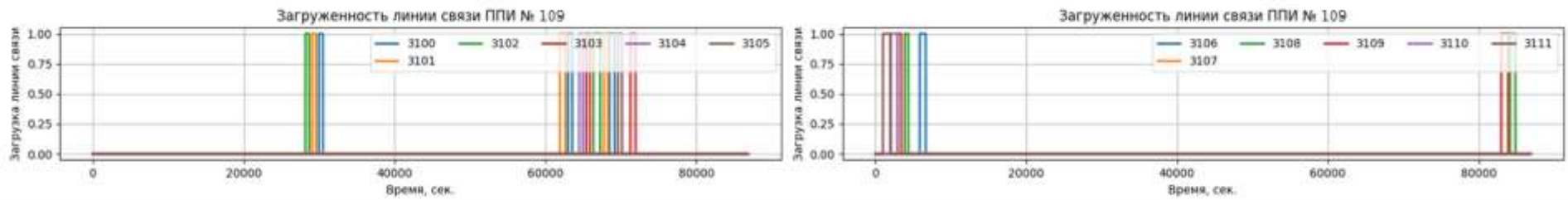
е)



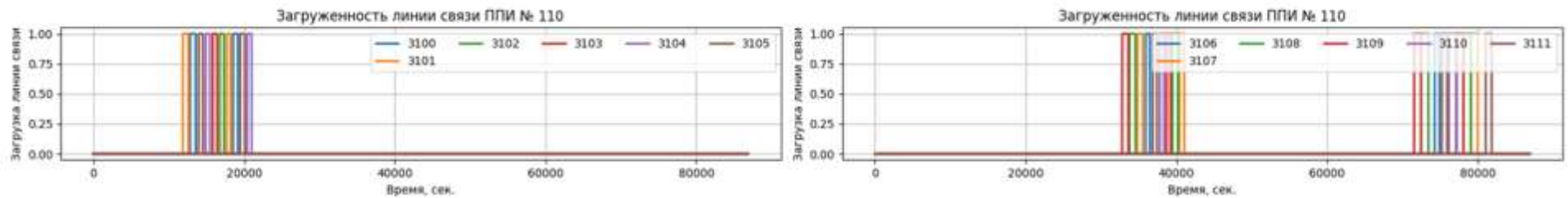
Ж)



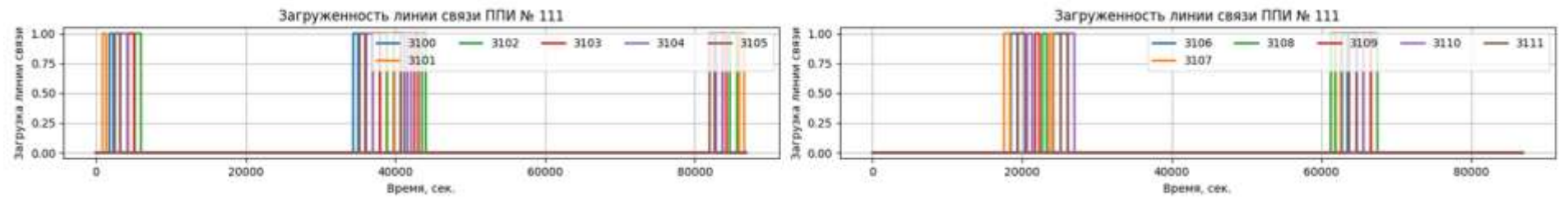
З)



И)



к)



л)

Рисунок 4.16 – График загруженности линий связи «КА-ППИ», а) – ППИ № 100, б) – ППИ № 101, в) – ППИ № 102, г) – ППИ № 103, д) – ППИ № 104, е) – ППИ № 105, ж) – ППИ № 106, з) – ППИ № 107, и) – ППИ № 109, к) – ППИ № 110, л) – ППИ № 111

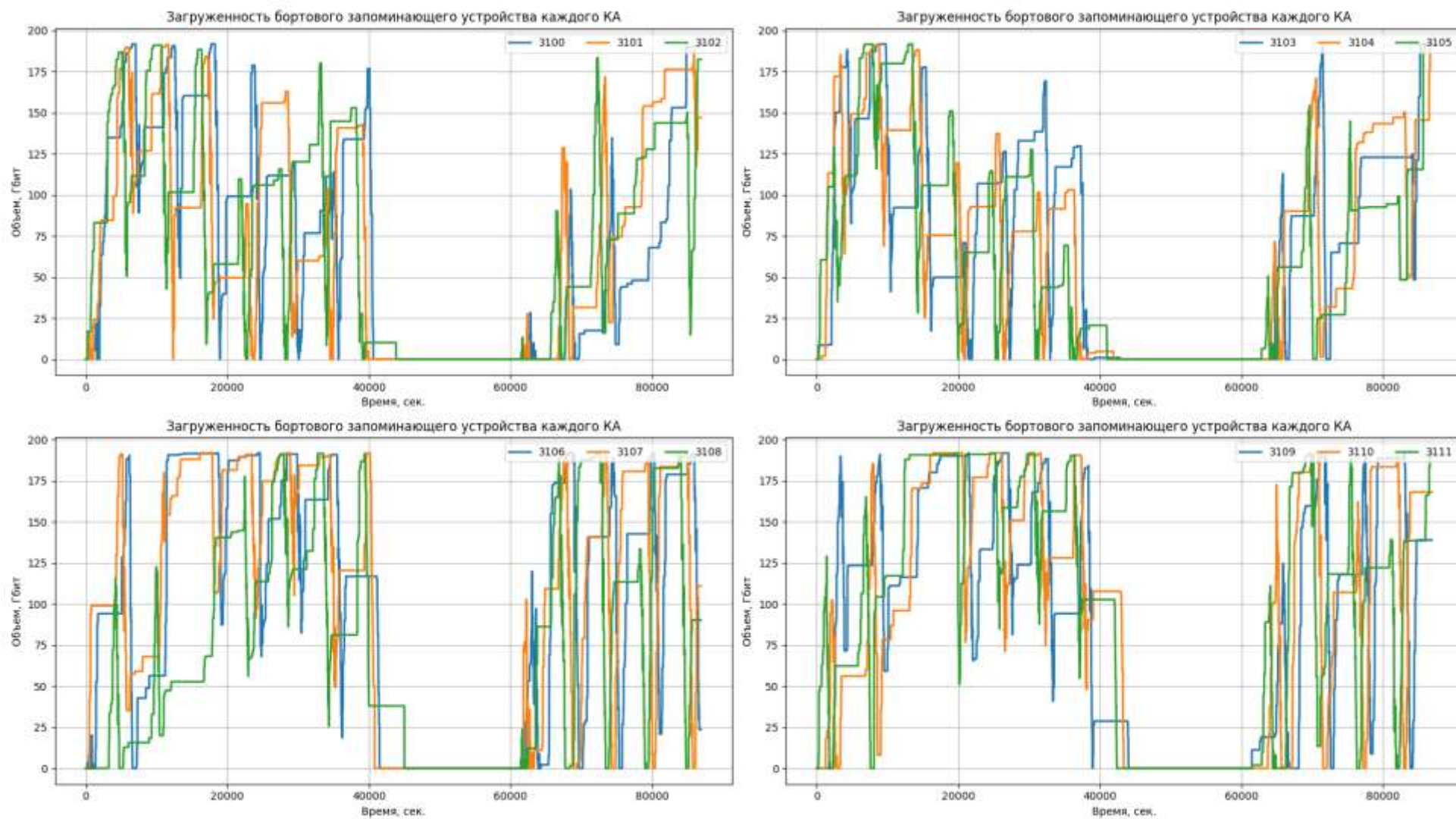


Рисунок 4.17 – График загруженности БЗУ каждого КА

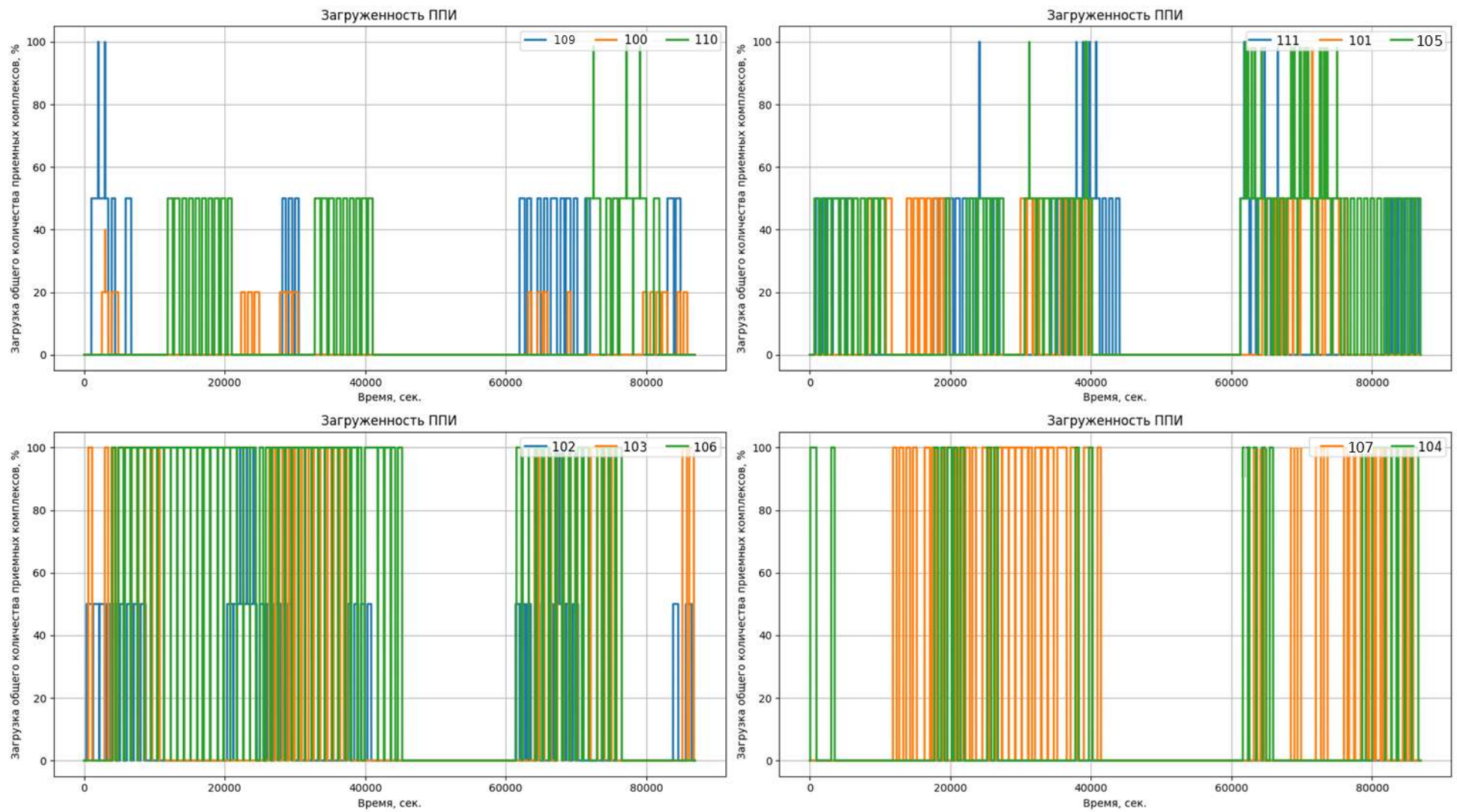


Рисунок 4.18 – График загруженности приемных средств каждого ППИ в процентном соотношении

Таблица 4.19 – Время работы и количество включений ЦА каждого КА

№	Код КА	Время работы ЦА на период планирования, сек.		Количество включений ЦА на период планирования, шт.	
		МСС	ПСС	МСС	ПСС
1.	3100	5792	4189	189	149
2.	3101	6375	4375	202	162
3.	3102	5757	4414	187	154
4.	3103	4859	4064	171	154
5.	3104	6090	3854	192	152
6.	3105	5689	3842	182	146
7.	3106	5596	4892	193	166
8.	3107	6028	5056	207	180
9.	3108	6673	4515	251	171
10.	3109	6633	4645	237	181
11.	3110	5449	5073	177	184
12.	3111	6424	4850	208	182

Полученные данные демонстрируют, что изменение баллистической структуры практически не влияет на время работы и количество включений ЦА, что подтверждает возможность ее использования.

В таблице 4.20 содержится информация о среднем времени передачи данных маршрутов съемки каждого КА при распределении информационного потока традиционным способом.

Таблица 4.20 – Среднее время передачи данных, 12 КА, традиционный вариант

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	1686.61
2.	3101	2339.71
3.	3102	2219.94
4.	3103	2453.65
5.	3104	2391.78
6.	3105	2139.28
7.	3106	2510.28
8.	3107	3141.21
9.	3108	2268.07
10.	3109	3096.71
11.	3110	2456.74
12.	3111	2327.98
Для всех КА		2394.418

В таблицах 4.21 – 4.24 представлены объемы ЦИ, переданные с конкретного КА на конкретный ППИ, время, затраченное на фактическую передачу данных, количество сеансов, переданных маршрутов съемки, а также количество маршрутов и объемы данных оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования.

Таблица 4.21 – Объемы ЦИ, переданных с конкретного КА на конкретный ППИ и оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования, Гб

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	78.48	2.032	165.04	170.072	45.512	294.943	482.159	142.472	88.599	125.6	213.056	191.984
3101	91.784	39.104	263.28	257.352	33.816	188.72	436.456	291.256	69.728	84.815	203.496	147.192
3102	55.624	137.632	28.928	186.184	0	219.176	386.344	339	124.168	22.048	406.335	182.552
3103	0.224	167.672	149.408	246.112	12.136	226.456	342.815	241.736	58.712	22.576	237.904	191.952
3104	69.432	131.352	37.72	211.968	17.952	285.103	374.824	165.12	0.112	49.48	347.616	191.96
3105	0	80.528	148.456	209.568	123.856	141.392	344.424	325.016	9.2	65.744	215.208	191.992
3106	8	369.008	107.064	143.84	311.24	142.712	583.615	75.056	91.263	67	347.816	23.56
3107	39.688	209.672	430.872	252.488	122.424	112.792	572.944	68.328	0	250.152	189.584	111.024
3108	128.912	129.536	325.111	92.528	127.712	132.832	404.936	71.904	65.56	467.287	143.064	90.304
3109	0.224	135.056	275.759	118.424	53.816	311.255	358.44	159.824	128.56	376.503	172.592	138.992
3110	72.247	402.624	138.944	131.624	115.568	129.944	410.991	160.736	132.216	184.16	287.168	168.12
3111	37.048	294.848	139.72	142.16	64.464	110.568	559.416	18.16	159.12	173.552	409.207	191.48
Итого	581.664	2099.064	2210.304	2162.32	1028.496	2295.896	5257.368	2058.608	927.24	1888.92	3173.048	1821.112

Таблица 4.22 – Время, затраченное на фактическую передачу ЦИ с конкретного КА на конкретный ППИ, с

Код КА	Код ППИ										
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111
3100	490	8	782	846	479	1082	1632	486	340	437	725
3101	453	135	1293	952	321	882	1516	1208	380	292	695
3102	400	475	100	726	0	1016	1312	1162	421	78	1381
3103	1	574	505	1016	42	944	1270	874	202	78	808
3104	236	454	128	848	63	1287	1283	562	1	169	1180
3105	0	281	503	754	617	851	1169	1321	31	225	755
3106	27	1253	361	570	1360	609	2063	257	317	230	1185
3107	133	716	1468	854	413	396	2179	240	0	847	654
3108	444	447	1141	314	432	470	1571	344	221	1584	602
3109	1	463	972	403	184	1076	1367	544	435	1283	596
3110	242	1362	469	447	392	540	1569	710	506	626	978
3111	141	1009	469	482	364	388	2108	61	552	627	1452
Итого	2568	7177	8137	8212	4667	9541	19039	7769	3406	6476	11011

Таблица 4.23 – Количество сеансов связи между конкретным КА и конкретным ППИ, шт.

Код КА	Код ППИ										
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111
3100	4	1	3	4	2	5	4	3	3	2	3
3101	2	1	4	4	2	6	4	6	3	2	3
3102	2	2	2	3	0	6	4	4	2	1	4
3103	1	2	3	4	2	5	4	3	2	1	4
3104	1	2	1	5	3	5	3	4	1	2	4
3105	0	3	2	5	3	6	3	6	1	2	4
3106	1	4	3	3	3	7	6	4	1	2	3
3107	2	2	4	3	1	5	6	3	0	3	3
3108	2	3	4	2	3	7	7	4	2	4	3
3109	1	3	3	2	2	5	5	2	2	4	2
3110	2	4	2	1	2	4	6	2	1	2	3
3111	1	5	3	1	1	5	7	2	1	3	3
Итого	19	32	34	37	24	66	59	43	19	28	39

Таблица 4.24 – Количество переданных маршрутов съемки с конкретного КА на конкретный ППИ и количество маршрутов съемки оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования, шт.

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	21	2	36	38	14	41	51	22	15	34	35	29
3101	17	9	53	42	6	35	72	47	13	22	29	19
3102	9	36	9	33	0	50	54	45	18	10	59	18
3103	1	32	17	45	3	62	66	40	14	6	30	9
3104	9	30	5	41	6	73	66	27	1	10	50	26
3105	0	26	20	33	29	41	50	59	1	12	45	12
3106	1	49	12	10	47	45	81	16	23	15	55	5
3107	3	40	74	29	11	36	95	25	0	30	37	7
3108	30	33	73	17	14	36	85	23	5	60	32	14
3109	1	25	75	14	8	80	61	26	12	59	42	15
3110	3	52	12	20	15	35	80	27	31	25	48	13
3111	5	53	11	17	3	33	102	3	26	40	68	29
Итого	100	387	397	339	156	567	863	360	159	323	530	196

Полученные результаты проведенного варианта моделирования демонстрируют:

- увеличение количества КА в группировке значительно повышает объем и количество получаемой ЦИ, но ППИ до сих пор остается ненагруженными (среднее значение загруженности линий связи КА-ППИ на период планирования ~18.74%, что практически в 2 раза больше, чем в аналогичном варианте с ОГ из 6 КА). Заданная конфигурация ПК на ППИ и количество ППИ являются избыточными для данной ОГ;
- все КА в ОГ загружены равномерно на периоде планирования, исходя из показателей графика загруженности БЗУ видно, что КА имеют небольшой потенциал использования БЗУ для хранения данных в качестве промежуточного узла системы;
- среднее время доставки данных выполненными маршрутов съемки на НКИ при заданной конфигурации составляет 2394.41 с и общим процентом выполнения возможных маршрутов съемки, с учетом загруженности доступных линий связи и БЗУ каждого КА, в 87.62%.

4.2.6 Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 12 КА

На рисунке 4.19 представлен график загруженности МЛС «КА-КА» по результатам проведенного моделирования варианта распределения ЦИ с возможностью ретрансляции по МЛС.

Загруженность БЗУ КА, приемных средств на ППИ представлены на рисунках 4.20 и 4.21 соответственно и демонстрируют перераспределение потока ЦИ в отличие от результатов моделирования традиционного варианта.

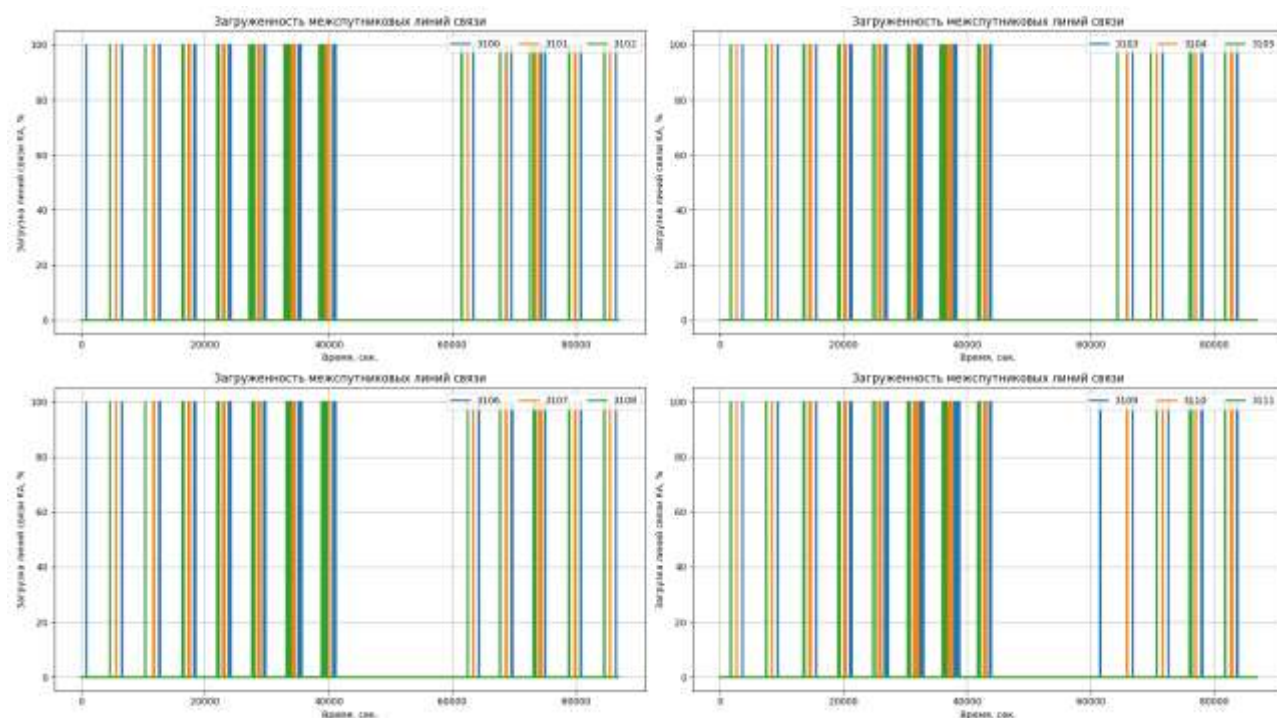


Рисунок 4.19 – Загруженность МЛС «КА-КА»

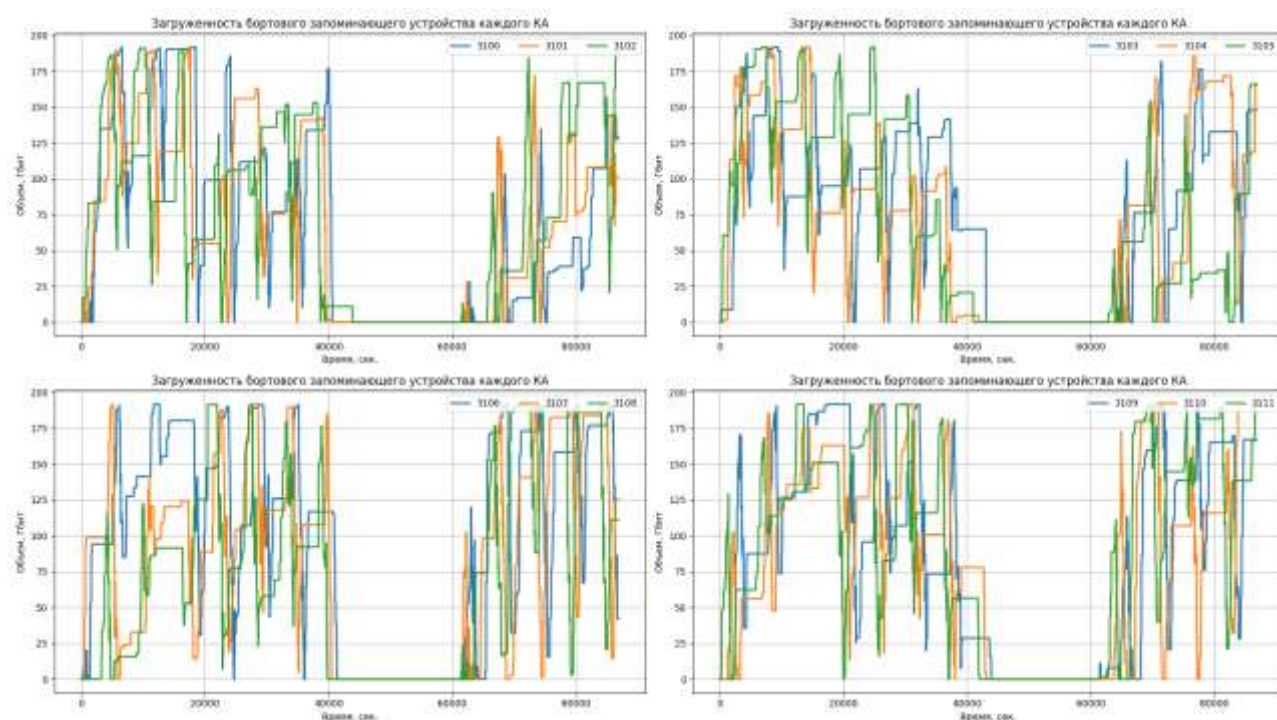


Рисунок 4.20 – Загруженность БЗУ КА

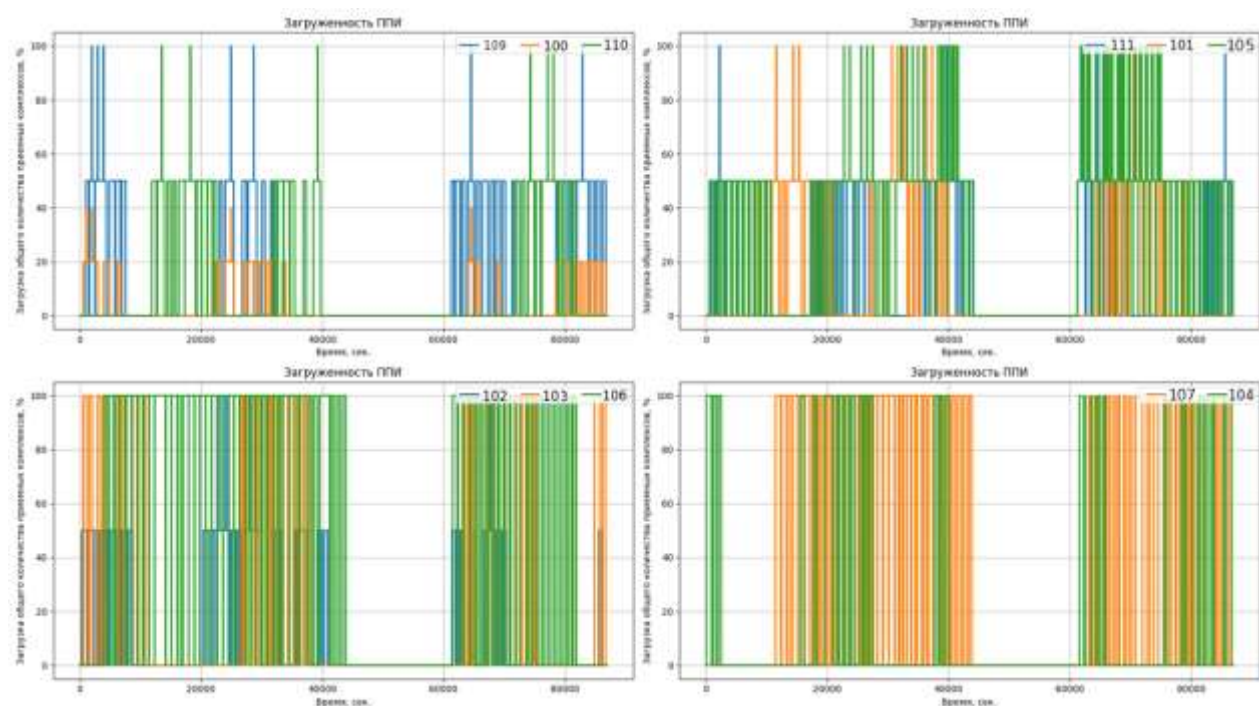


Рисунок 4.21 – Загруженность приемных средств на ППИ

В таблицах 4.25 и 4.26 содержатся данные о суммарном итоге целевых операций работы ЦА при рассмотрении возможности ретрансляционного распределения потока ЦИ, а также среднего времени передачи на НКИ соответственно.

Таблица 4.25 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА, при возможности ретрансляционного распределения ЦИ

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	361	327	90.58
2.	3101	384	367	95.57
3.	3102	368	345	93.75
4.	3103	373	348	93.29
5.	3104	378	350	92.59
6.	3105	368	339	92.11
7.	3106	463	393	84.88
8.	3107	458	410	89.51
9.	3108	461	413	89.58
10.	3109	469	418	89.12
11.	3110	451	397	88.02
12.	3111	461	402	87.2
ИТОГО		4995	4509	90.27

Таблица 4.26 – Среднее время передачи ЦИ, 12 КА, вариант с возможностью ретрансляционного распределения ЦИ

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	2018.16
2.	3101	2191.83
3.	3102	2123.35
4.	3103	2445.44
5.	3104	2374.27
6.	3105	2349.41
7.	3106	2435.39
8.	3107	2121.54
9.	3108	1963.92
10.	3109	2387.33
11.	3110	1859.28
12.	3111	2788.24
Для всех КА		2254.85

Полученные результаты моделирования ОГ КА из 12 КА с распределением потока ЦИ с возможностью ретрансляции между парами КА (без возможности записи данных в БЗУ «промежуточных» КА) демонстрируют:

- увеличение общего объема выполнения предложенных на этапе планирования маршрутов съемок до 90.2% (против традиционного распределения ЦИ – 87.62%);
- уменьшение среднего времени передачи ЦИ на НКИ в 1.06 раз;
- средняя загруженность наземно-космических линий связи на период планирования возросла с 18.7% до 22.36%, что объясняется повышенным объемом ЦИ и перераспределением потоков при ускорении доставки данных с КА на ППИ;
- увеличение количества КА в ОГ, а также изменение баллистической структуры повышает значимость МЛС для передачи ЦИ между КА.

4.2.7 Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 12 КА

На рисунках 4.22 – 4.24 представлены графики загруженности БЗУ каждого КА, загруженности МЛС и загруженности приемных средств ППИ.

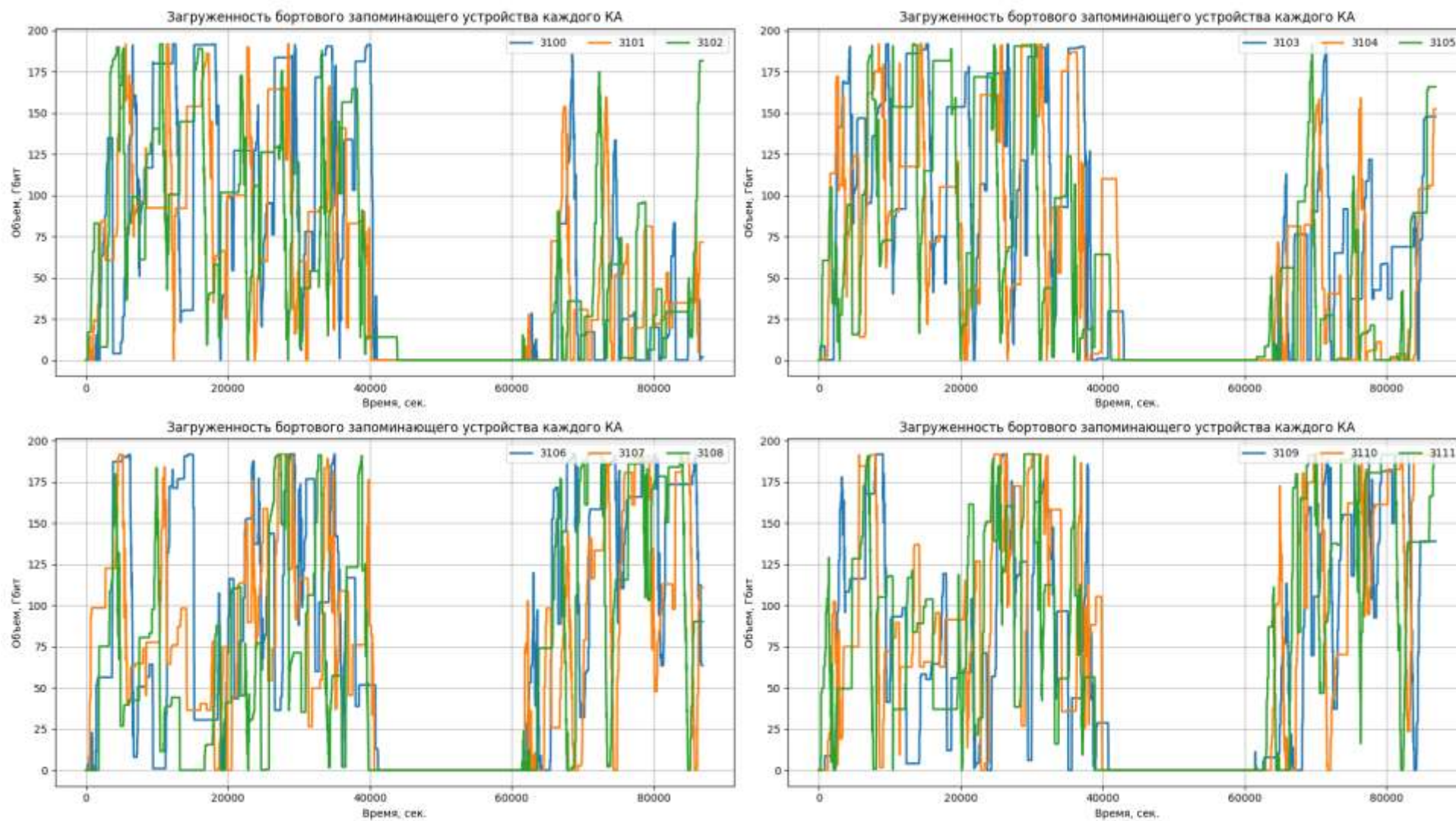


Рисунок 4.22 – Загруженность БЗУ КА

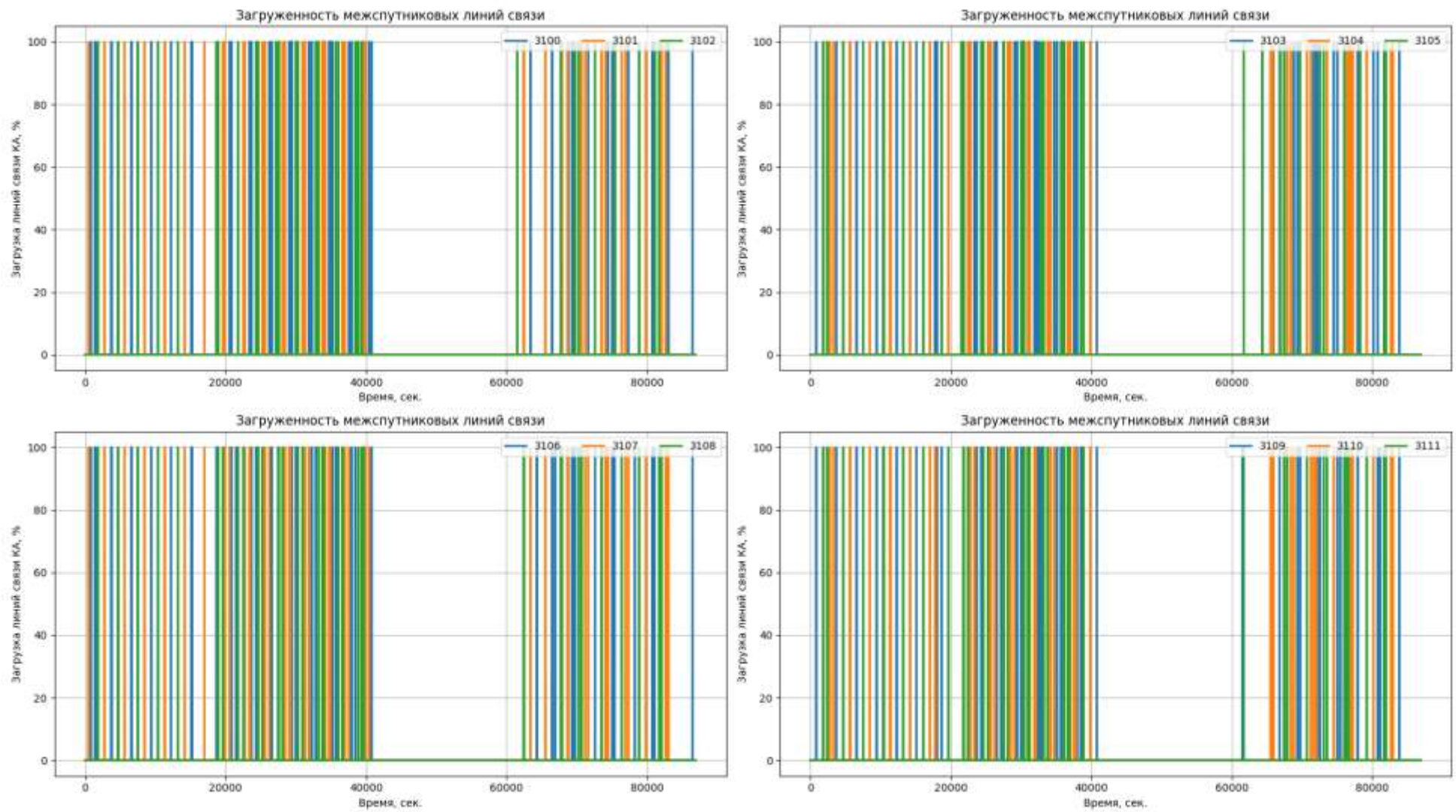


Рисунок 4.23 – Загруженность МЛС «КА-КА»

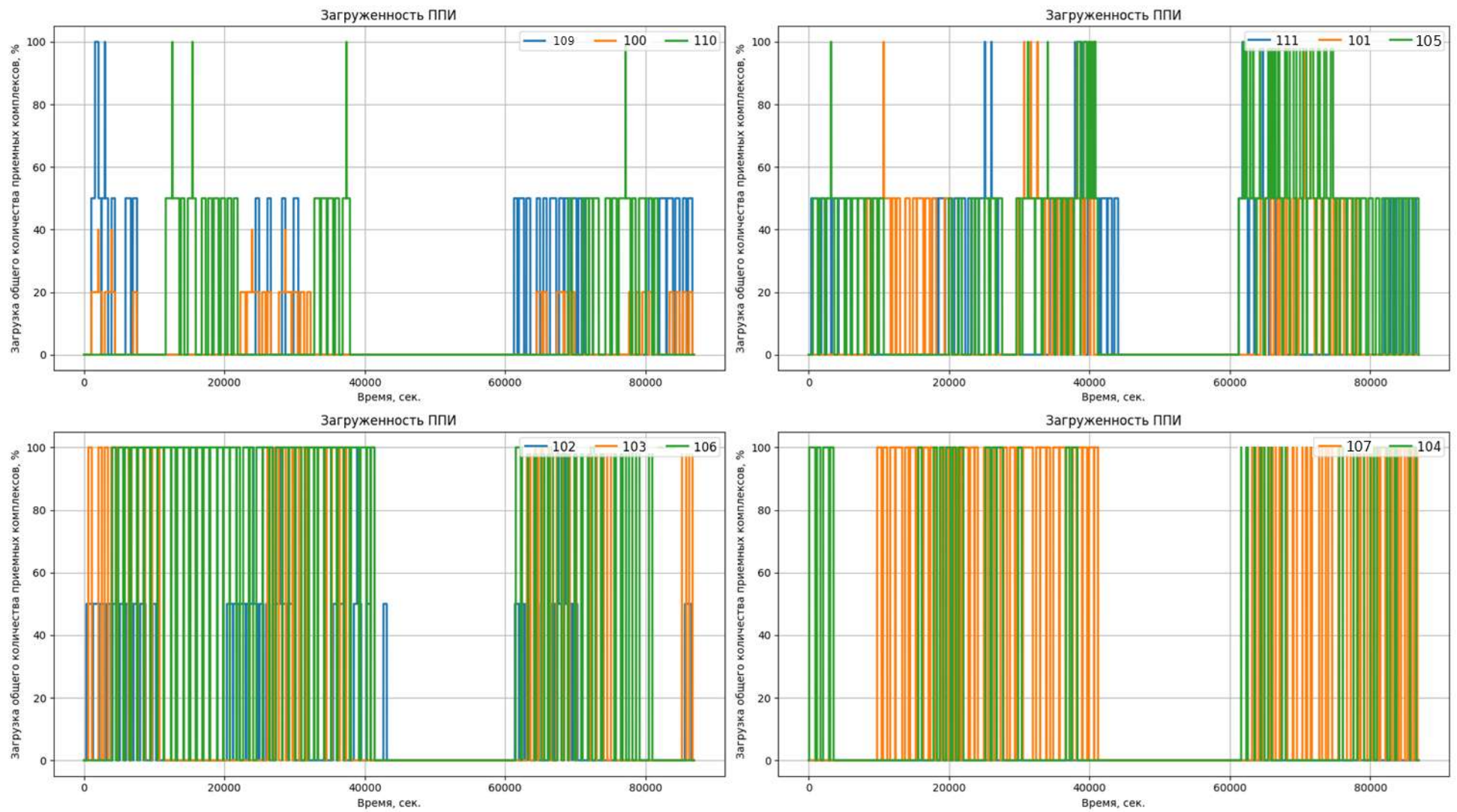


Рисунок 4.24 – Загруженность приемных средств ППИ

В таблицах 4.27 и 4.28 представлены результирующие данные моделирования о суммарном итоге целевых операций работы ЦА при рассмотрении возможности распределения ЦИ в МЛС «КА-КА» с записью в БЗУ «промежуточного» КА, а также среднего времени доставки данных на НКИ соответственно.

Таблица 4.27 – Суммарный итог целевых операций работы ЦА, при возможности распределения ЦИ в МЛС «КА-КА» с записью в БЗУ «промежуточного» КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	361	316	87.53
2.	3101	384	347	90.36
3.	3102	368	341	92.66
4.	3103	373	332	89
5.	3104	378	333	88.09
6.	3105	368	331	89.94
7.	3106	463	391	84.44
8.	3107	458	412	89.95
9.	3108	461	396	85.9
10.	3109	469	407	86.78
11.	3110	451	377	83.59
12.	3111	461	400	86.76
ИТОГО		4995	4383	87.74

Таблица 4.28 – Среднее время передачи данных, 12 КА, вариант с МЛС и записью ЦИ в БЗУ «промежуточного» КА

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, с
1.	3100	1785.6
2.	3101	2062.8
3.	3102	1742.72
4.	3103	2000.12
5.	3104	1965.11
6.	3105	1667.94
7.	3106	2256.65
8.	3107	2175.79
9.	3108	2076.05
10.	3109	2627.37
11.	3110	2392.97
12.	3111	1784.1
Для всех КА		2044.77

Полученные результаты моделирования демонстрируют:

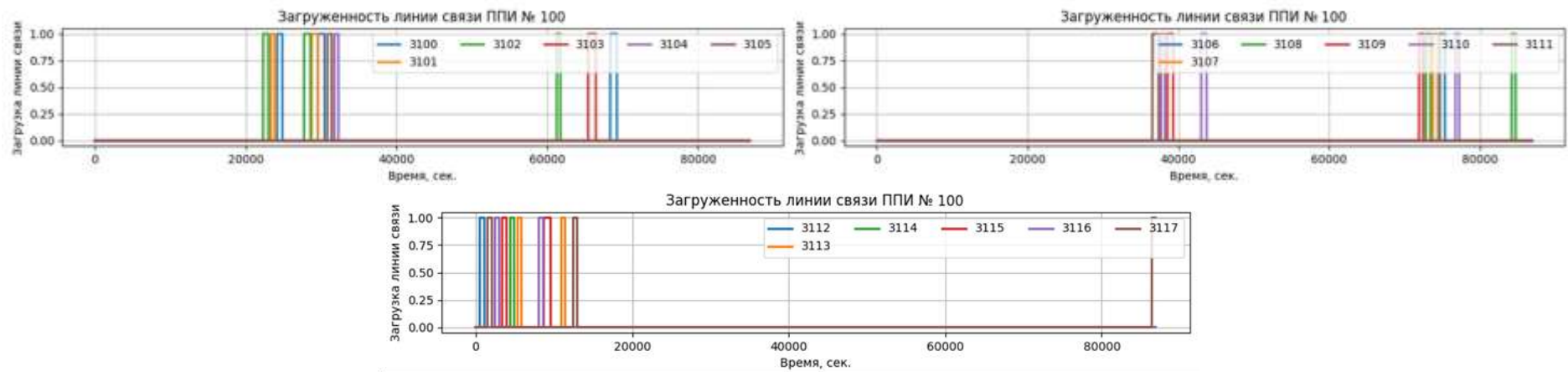
- возможность записи ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА повышает возможность использования МЛС для передачи ЦИ, не внося значительных изменений в загруженность БЗУ каждого КА;
- общий объем выполнения предложенных на этапе планирования маршрутов съемок равен 87.74%, что ниже аналогичного показателя при возможности ретрансляционного распределения;
- уменьшение среднего времени передачи ЦИ на НКИ в 1.1 раз от варианта с возможностью ретрансляционного распределения;
- средняя загруженность наземно-космических линий связи на период планирования составляет 21.02%, что ниже, чем при ретрансляционном распределении при понижении количества маршрутов съемок, что снижает общий объем ЦИ.

4.2.8 Традиционный вариант распределения целевой информации для ОГ из 18 КА

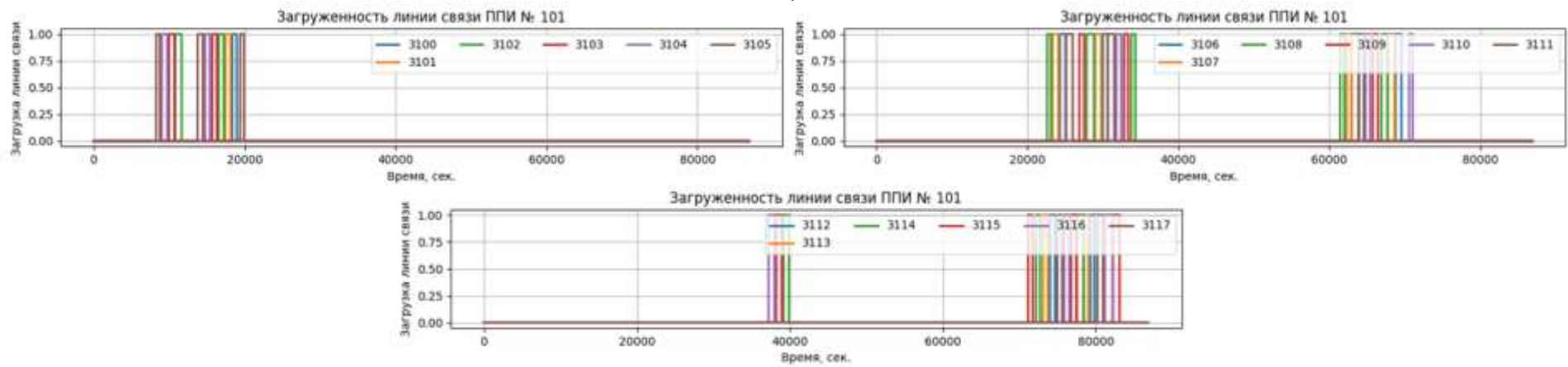
В рассматриваемом варианте увеличено количество орбитальных плоскостей до 3 штук (по 6 КА в каждой, итого 18 КА), где КА распределены равномерно. Орбитальные плоскости незначительно разнесены по высоте.

Загруженность наземно-космических линий связи между каждым ППИ и каждым КА при традиционном варианте распределения ЦИ демонстрируется на рисунке 4.25. График загруженности БЗУ каждого КА представлен на рисунке 4.26. Загруженность ППИ представлена на рисунке 4.27 (где 100% - одновременная работы всех доступных ПК на ППИ).

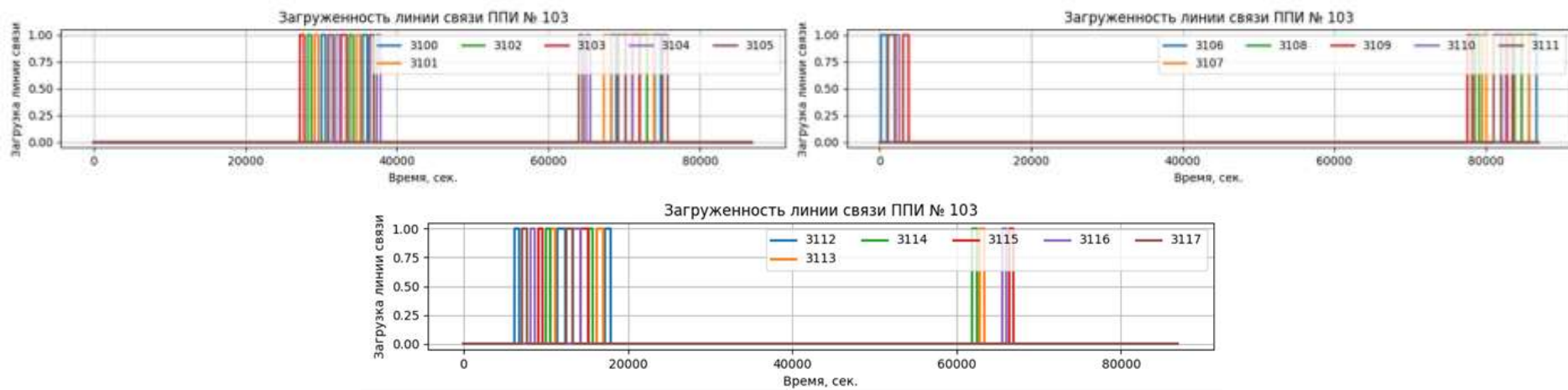
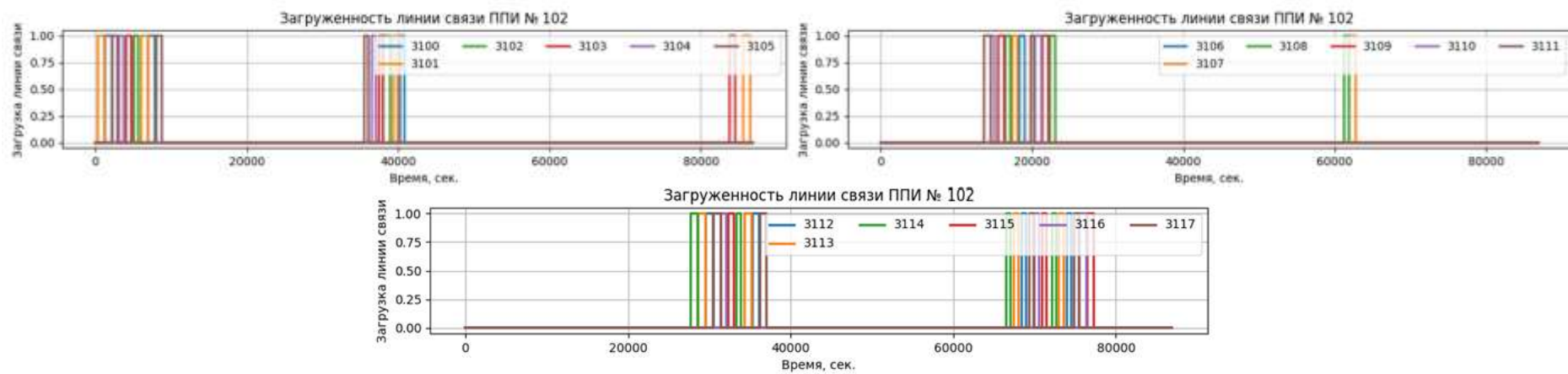
Количество возможных интервалов работы ЦА съемки каждого КА, полученных по результатам моделирования, а также утвержденных с учетом загруженности всей системы при традиционном распределении информационных потоков представлено в таблице 4.29.

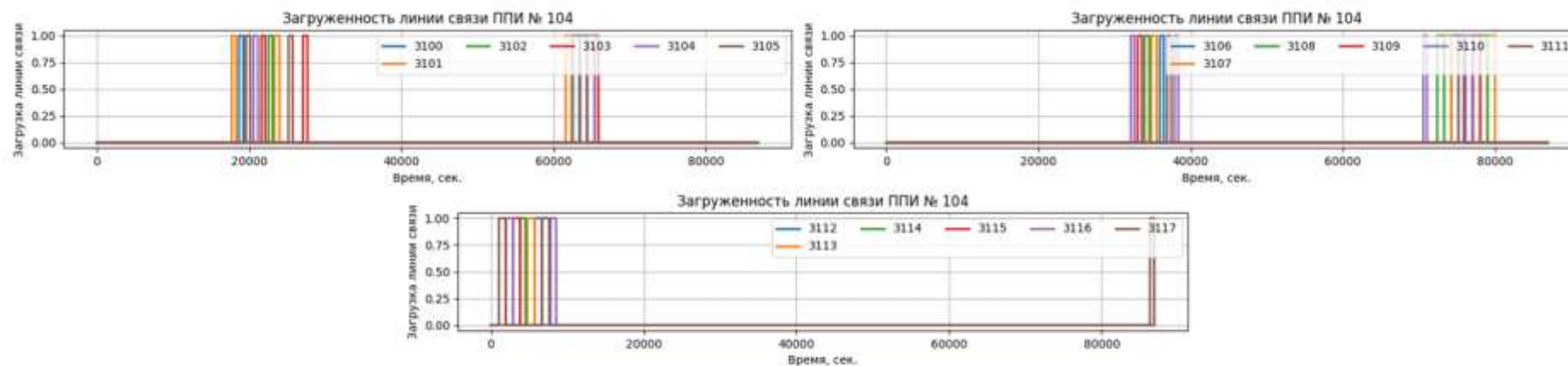


а)

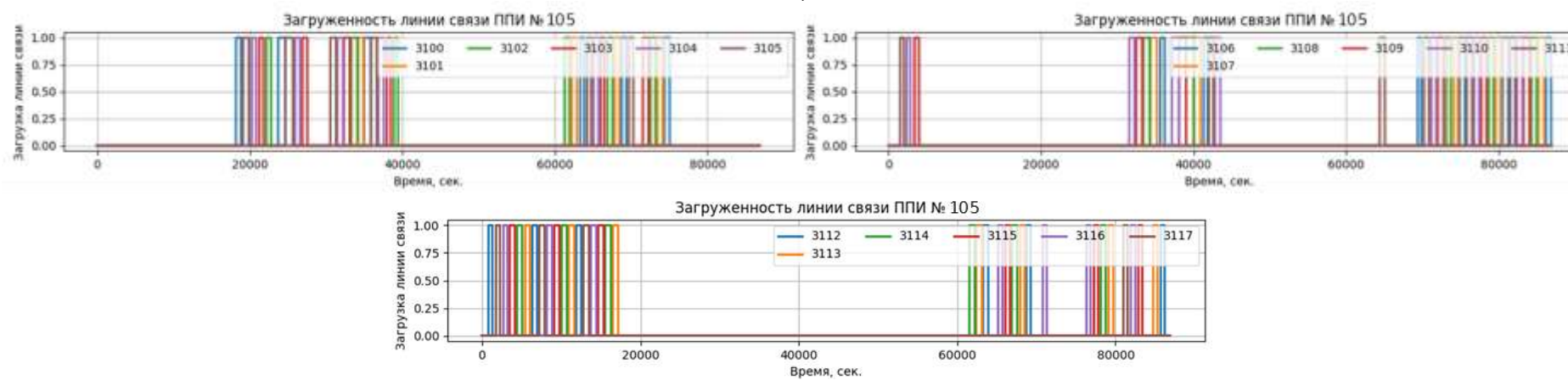


б)

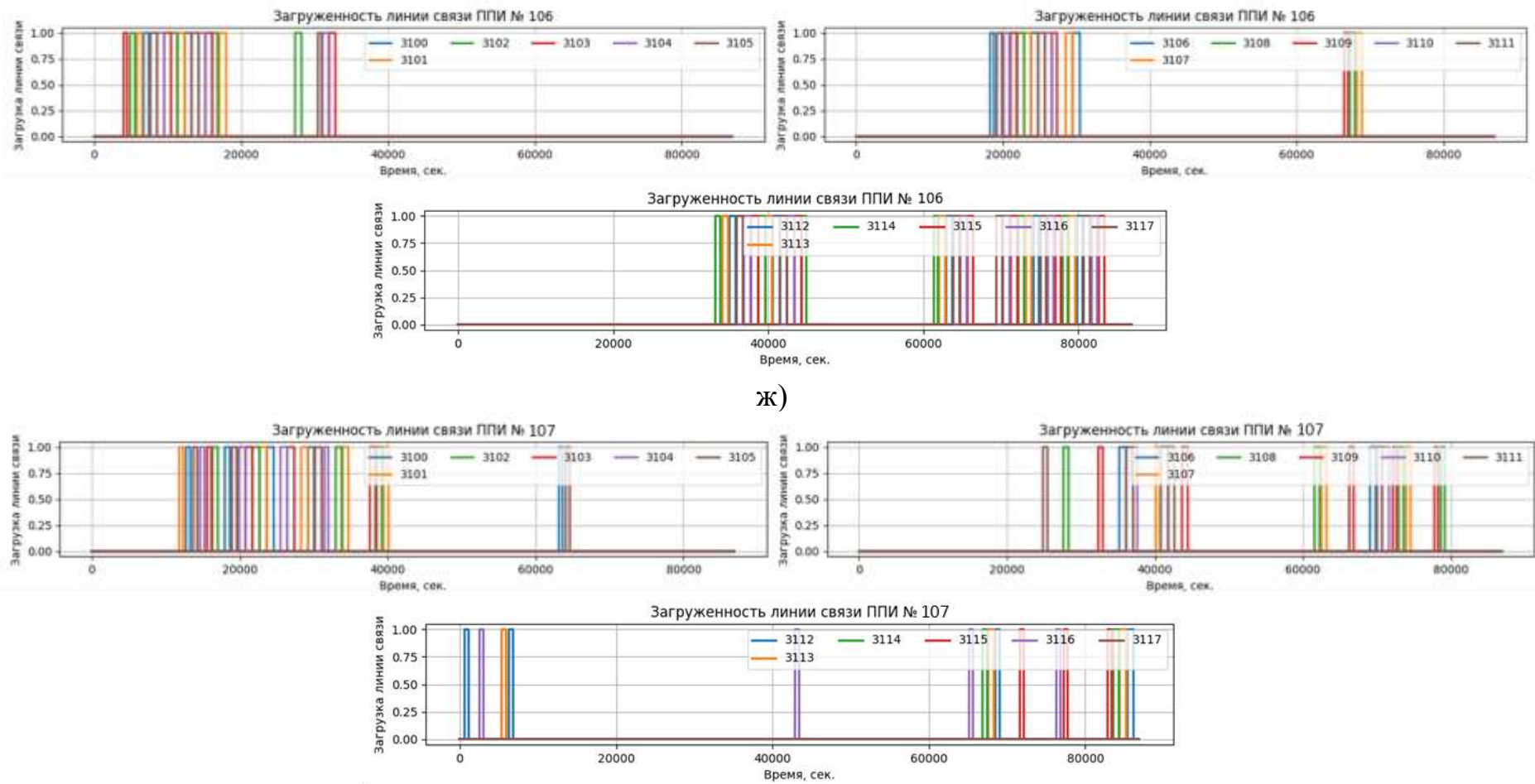


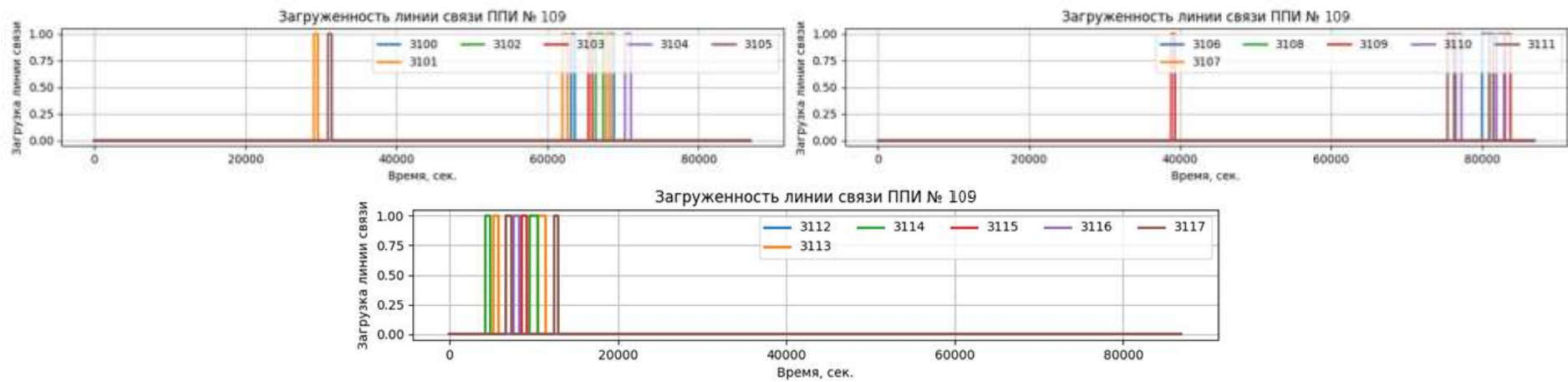


д)

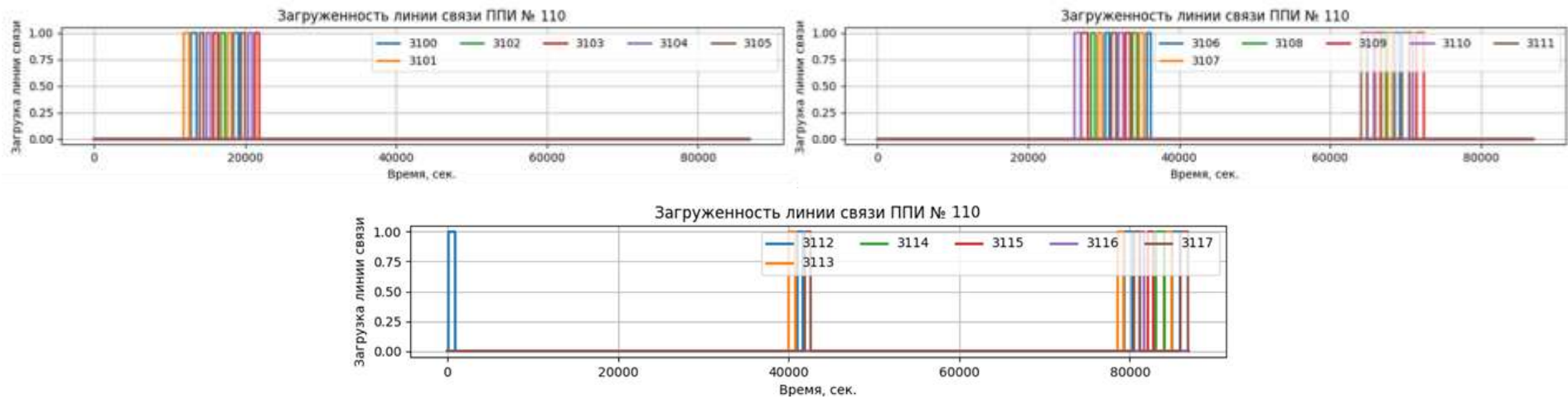


е)

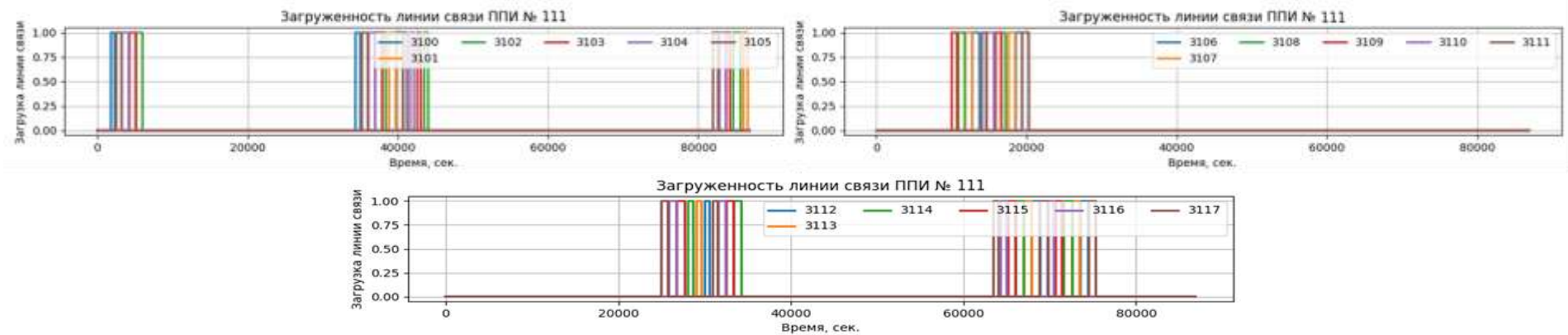




и)

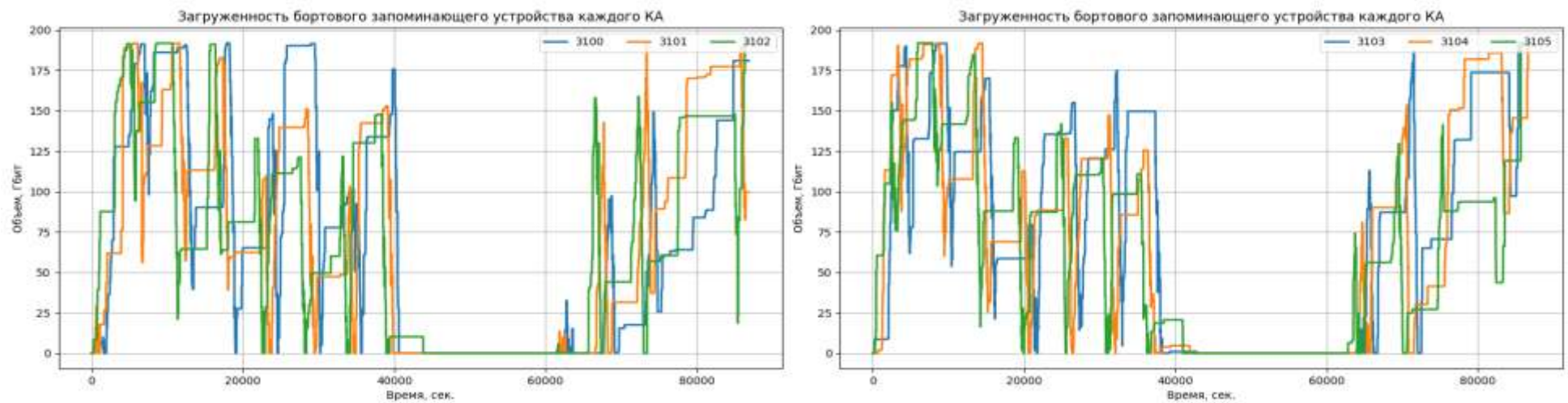


к)

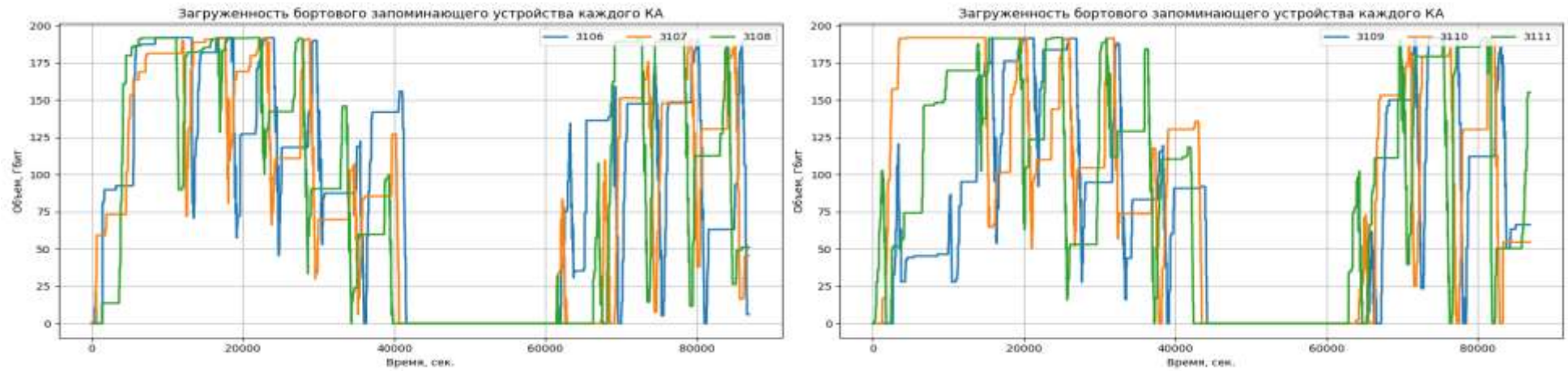


л)

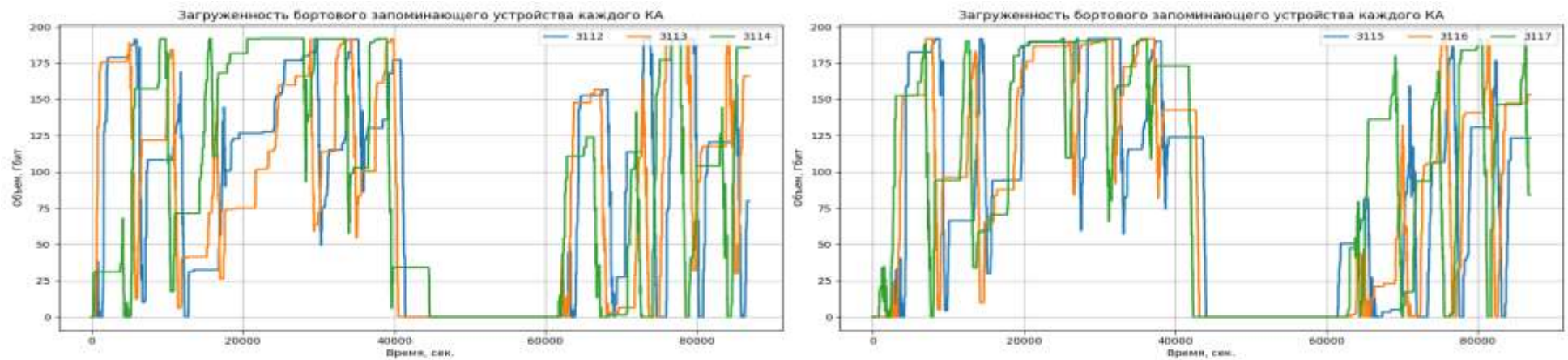
Рисунок 4.25 – График загруженности линий связи «КА-ППИ», а) – ППИ № 100, б) – ППИ № 101, в) – ППИ № 102, г) – ППИ № 103, д) – ППИ № 104, е) – ППИ № 105, ж) – ППИ № 106, з) – ППИ № 107, и) – ППИ № 109, к) – ППИ № 110, л) – ППИ № 111



а)



б)



в)

Рисунок 4.26 – График загруженность БЗУ каждого КА, а) – для КА 3100 - 3105, б) – для КА 3106 - 3111, в) – для КА 3112 - 3117

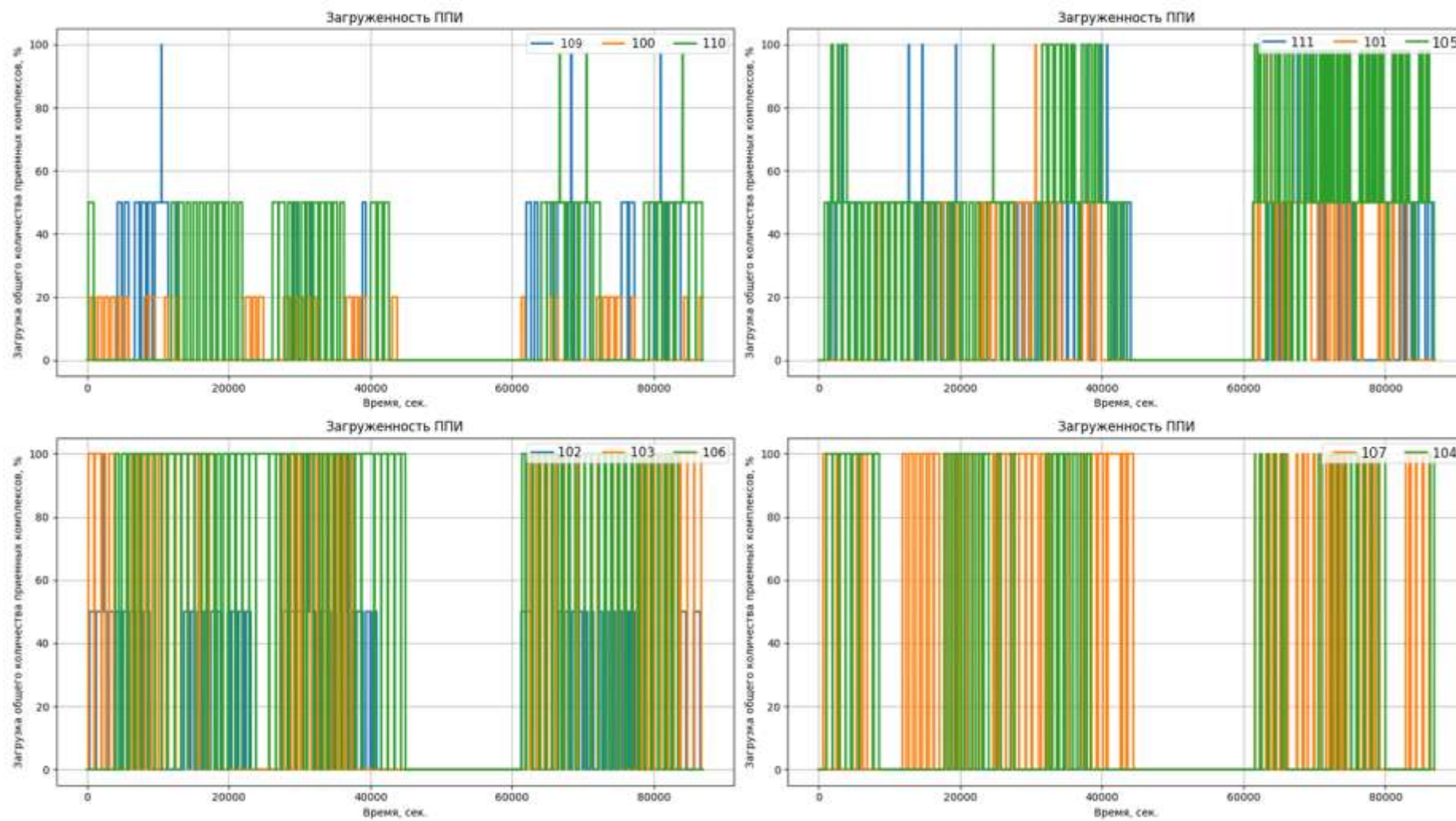


Рисунок 4.27 – График загруженности приемных средств каждого ППИ в процентном соотношении

Таблица 4.29 – Количество возможных интервалов работы ЦА съемки каждого КА по результатам проведенного моделирования, традиционный вариант распределения ЦИ, 18 КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА съемки, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА съемки, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА съемки
1.	3100	367	340	92.64
2.	3101	380	354	93.15
3.	3102	356	310	87.07
4.	3103	350	302	86.28
5.	3104	368	321	87.22
6.	3105	354	314	88.7
7.	3106	434	373	85.94
8.	3107	429	385	89.74
9.	3108	441	349	79.13
10.	3109	470	411	87.44
11.	3110	482	403	83.6
12.	3111	469	404	86.14
13.	3112	485	429	88.45
14.	3113	503	460	91.45
15.	3114	494	378	76.51
16.	3115	447	386	86.35
17.	3116	451	383	84.92
18.	3117	528	466	88.25
ИТОГО		7808	6768	86.68

Время работы ЦА съемки и количество включений представлено в таблице 4.30, данные отображены по утвержденным в ходе моделирования целевым операциям.

Таблица 4.30 – Время работы и количество включений ЦА съемки каждого КА

№	Код КА	Время работы ЦА на период планирования, сек.		Количество включений ЦА на период планирования, шт.	
		МСС	ПСС	МСС	ПСС
1.	3100	5526	4303	189	151
2.	3101	5888	4468	196	158
3.	3102	5391	4496	166	144
4.	3103	5351	4348	157	145
5.	3104	4980	4165	169	152
6.	3105	5635	3889	167	147
7.	3106	5960	4713	197	176
8.	3107	5780	4473	213	172

9.	3108	5084	3970	192	157
10.	3109	5370	4547	230	181
11.	3110	5271	4019	215	188
12.	3111	5934	4920	210	194
13.	3112	5765	4384	253	176
14.	3113	6758	4908	253	207
15.	3114	4731	4380	193	185
16.	3115	5309	4445	204	182
17.	3116	5128	4312	195	188
18.	3117	6081	4555	258	208

В таблице 4.31 представлена информация о среднем времени передачи данных маршрутов съемки каждого КА при распределении информационного потока традиционным способом.

Таблица 4.31 – Среднее время передачи данных, 18 КА, традиционный вариант

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, сек.
1.	3100	1780.99
2.	3101	2298.92
3.	3102	2357.38
4.	3103	2330.57
5.	3104	2279.52
6.	3105	2157.4
7.	3106	2762.1
8.	3107	3075
9.	3108	3495.82
10.	3109	2580.94
11.	3110	3940.97
12.	3111	2925.84
13.	3112	3066.55
14.	3113	2522.94
15.	3114	3611.89
16.	3115	2576.6
17.	3116	2852
18.	3117	3023.27
Для всех КА		2757.71

В таблица 4.32 – 4.35 представлены объемы ЦИ, переданные с конкретного КА на конкретный ППИ, время, затраченное на фактическую передачу данных, количество сеансов, переданных маршрутов съемки, а также количество маршрутов и объемы данных оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования.

Таблица 4.32 – Объемы ЦИ, переданные с конкретного КА на конкретный ППИ и оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования, Гб

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	252.84	23.488	182.424	166.768	71.487	305.223	192.792	315.664	0.728	136.208	201.952	181.08
3101	93.272	60.048	327.536	286.88	47.080	151.008	334.784	411.159	34.464	93.951	177.008	99.736
3102	82.392	160.864	170.288	137.296	16	204.512	338.919	359.303	158.512	25.984	254.24	191.984
3103	138.75	114.368	154.088	187.352	32.36	242.144	359.408	344.48	0.056	36.672	237.232	191.944
3104	11.072	120.448	52.456	138.176	124.728	178.576	355.864	312.36	75.608	29.024	354.616	191.952
3105	2.83	83.376	150.544	235.2	132.24	363.359	251.224	195.584	5.6	20.744	238.592	191.864
3106	52.32	387.479	64.6	181.632	136.352	236.888	300.656	361.168	152.616	95.376	243.872	6
3107	48.3	283.935	175.848	154.16	324.512	390.184	284.856	66.6	0	94.24	244.664	45.576
3108	53.6	252.824	157.016	158.256	301.816	365.719	138	145.488	0	120.072	128.744	51.168
3109	80.095	137.8	192.408	169.52	161.928	445.376	165.944	155.96	73.704	336.991	133.424	66.368
3110	82.728	86.231	115.136	34.272	116.168	404.167	208.656	154.736	227.912	255.624	162.504	54.64
3111	104.056	279.728	122.672	273.184	78.24	208.656	180.96	287.912	141.576	296.368	171.68	155.272
3112	31.352	62.696	269.215	236.967	143.368	107.88	399.759	105.52	0	349.783	289.992	79.904
3113	2.64	93.448	311.328	133.856	137.296	239.792	361.207	185.208	171.128	268.544	270.992	166.208
3114	2.408	252.448	142.592	21.832	67.936	242.408	289.288	77.455	152.264	154.88	427.848	185.576
3115	143.768	279.28	163.856	127.312	45.528	175.608	523.647	13.824	39.344	42.84	397.007	123.288
3116	46.384	288.104	195.512	147.864	91.552	180.76	499.599	27.848	52.704	0.056	328.279	153.304
3117	32.856	113.504	280.488	122.048	233.656	141.832	501.311	0	55.6	230.712	366.408	84.12
Итого	1261.672	3080.072	3228.008	2912.576	2262.248	4584.095	5686.879	3520.272	1341.816	2588.072	4629.056	2219.984

Таблица 4.33 – Время, затраченное на фактическую передачу ЦИ с конкретного КА на конкретный ППИ, с

Код КА	Код ППИ										
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111
3100	1046	79	1023	705	460	1394	654	1099	3	472	683
3101	329	207	1288	1017	515	712	1132	1459	246	323	608
3102	615	552	575	473	54	962	1157	1241	535	89	862
3103	530	397	521	745	127	830	1222	1273	1	125	801
3104	71	418	179	531	560	924	1209	1061	304	128	1199
3105	76	287	514	850	552	1464	857	676	19	93	804
3106	178	1325	219	835	467	810	1027	1228	517	325	857
3107	164	1154	597	520	1149	1377	1083	358	0	319	834
3108	180	955	590	539	1023	1334	643	668	0	413	442
3109	374	471	663	576	548	1640	609	597	250	1362	460
3110	289	297	394	116	400	1455	726	522	768	933	560
3111	359	1019	422	928	263	876	652	1139	480	1005	591
3112	105	210	929	814	483	526	1532	450	0	1366	992
3113	11	317	1059	492	462	1057	1469	649	585	913	926
3114	9	857	502	162	232	1173	1157	347	605	530	1470
3115	480	958	558	451	450	735	1926	50	134	147	1383
3116	162	983	672	500	671	649	1939	116	179	1	1168
3117	115	398	962	441	943	489	1851	0	192	783	1304
Итого	5093	10884	11667	10695	9359	18407	20845	12933	4818	15944	15944

Таблица 4.34 – Количество сеансов связи между конкретным КА и конкретным ППИ, шт.

Код КА	Код ППИ										
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111
3100	3	1	3	4	2	6	2	5	2	2	3
3101	2	1	4	4	3	4	3	5	3	2	2
3102	3	2	2	3	1	6	4	4	1	1	4
3103	1	2	3	3	3	6	4	4	1	2	4
3104	1	2	2	4	2	5	3	4	1	2	4
3105	1	3	3	5	3	6	3	4	1	2	4
3106	1	4	1	2	2	6	3	3	1	3	2
3107	1	4	2	2	3	5	3	3	0	3	2
3108	2	5	3	2	3	5	2	4	0	3	2
3109	2	3	2	3	2	6	3	5	2	4	2
3110	3	3	2	2	4	7	2	2	2	4	1
3111	1	3	2	2	2	6	2	4	2	3	2
3112	1	2	4	3	1	6	5	4	0	4	3
3113	2	2	4	3	1	7	5	3	2	3	3
3114	1	3	4	3	1	6	6	2	2	1	4
3115	2	4	3	3	1	6	6	3	1	1	4
3116	2	3	3	3	2	7	6	4	1	1	4
3117	3	2	4	2	3	4	6	0	2	3	5
Итого	32	49	51	53	39	104	68	63	24	44	55

Таблица 4.35 – Количество переданных маршрутов съемки с конкретного КА на конкретный ППИ и количество маршрутов съемки оставшиеся в БЗУ КА на момент окончания периода планирования, шт.

Код КА	Код ППИ											БЗУ
	100	101	102	103	104	105	106	107	109	110	111	
3100	37	2	34	31	18	69	26	29	2	33	24	35
3101	21	11	45	49	12	31	42	71	9	20	33	10
3102	21	29	16	29	1	47	58	43	17	5	32	12
3103	26	32	20	23	6	45	53	52	1	8	24	12
3104	5	30	9	17	29	42	55	46	12	11	43	22
3105	4	21	28	48	20	70	43	38	1	6	22	13
3106	8	72	8	23	23	52	57	49	18	20	42	1
3107	7	66	30	15	42	97	59	13	0	14	36	6
3108	2	63	27	21	37	76	40	25	0	25	28	5
3109	13	21	49	23	20	98	41	24	9	71	32	10
3110	18	44	23	3	24	124	66	11	23	44	41	4
3111	18	55	24	35	8	74	34	36	19	36	33	32
3112	2	4	61	47	11	39	125	33	0	47	53	7
3113	4	14	45	32	9	81	107	33	27	37	53	18
3114	1	29	45	9	10	63	63	8	17	27	90	16
3115	3	57	26	30	14	41	97	8	6	7	83	14
3116	13	44	40	20	20	44	87	13	6	1	77	18
3117	10	40	63	24	34	33	107	0	17	28	95	15
Итого	213	612	593	479	338	1126	1160	532	184	440	841	250

Результаты моделирования ОГ КА из 18 КА при традиционном распределении информационных потоков демонстрируют:

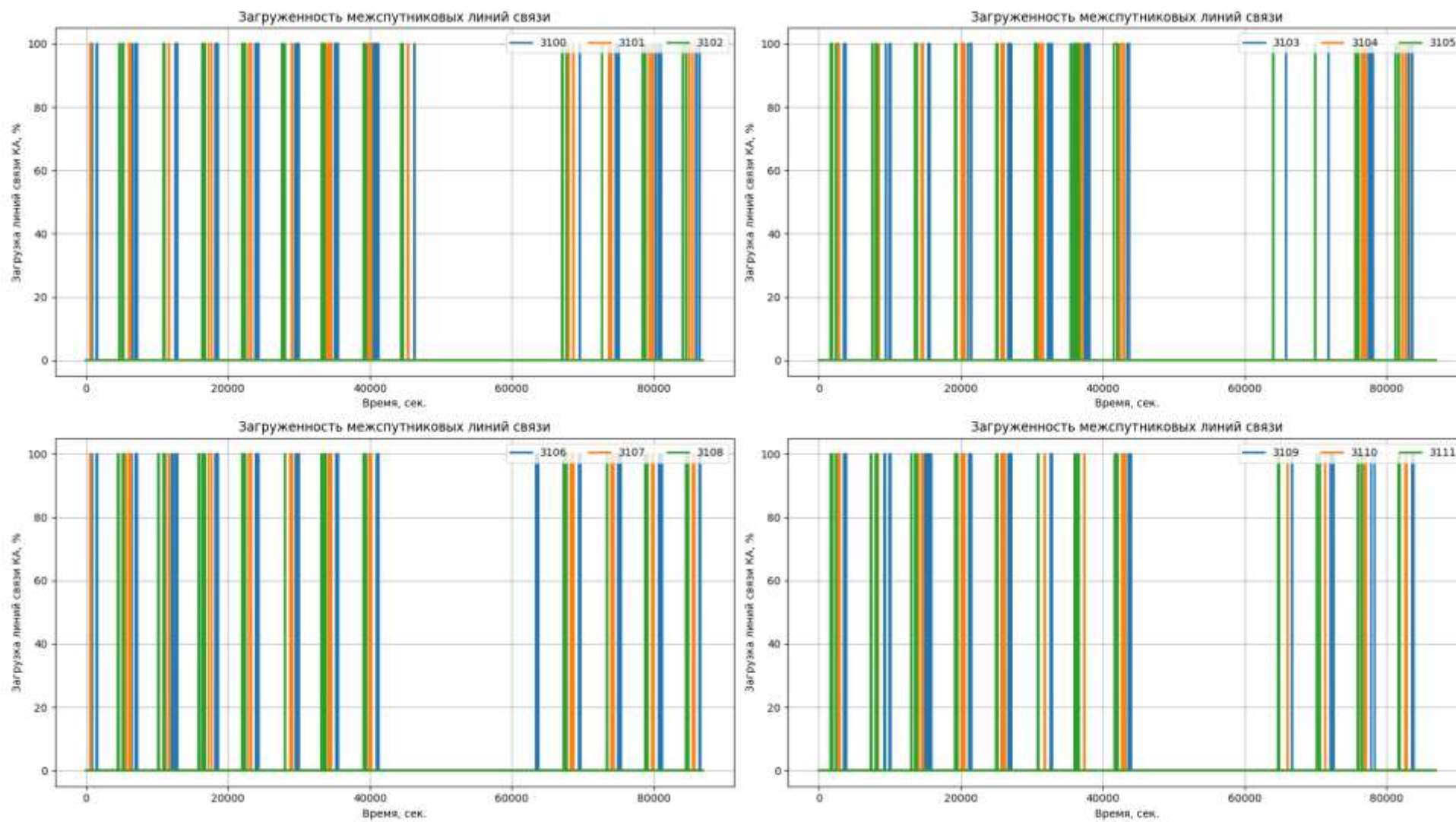
- увеличение количества КА повышает общий объем ЦИ (и количество маршрутов съемки) при средней загруженности наземно-космических линий связи на период планирования ~26.75%, что превышает значение аналогичного параметра в варианте с 12 КА. Заданная конфигурация ПК на ППИ и количество ППИ является избыточными и для данной ОГ;
- каждый КА загружен равномерно на достаточно высоком уровне, как было отмечено ранее – из-за большого количества и площади регионов интереса;
- среднее время доставки ЦИ выполненных маршрутов съемки на НКИ при заданной конфигурации составляет 2757.71 с и общим процентов выполнения возможных маршрутов съемки с учетом загруженности доступных линий связи и БЗУ каждого КА в 86.68%.

4.2.9 Вариант распределения целевой информации с возможностью ретрансляции по МЛС для ОГ из 18 КА

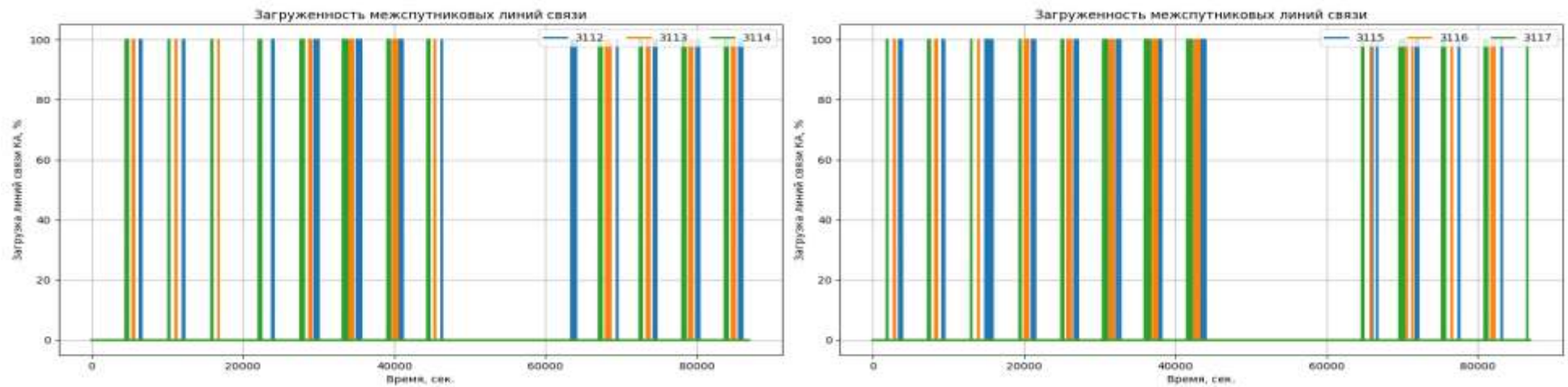
График загруженности МЛС при возможности ретрансляционного распределения ЦИ представлен на рисунке 4.28. Основным отличием от аналогичного варианта распределения ЦИ, но с меньшим количеством КА – является повышение общей загруженности МЛС.

Графики загруженности БЗУ КА и загруженности приемных средств на ППИ представлены на рисунках 4.29 и 4.30 соответственно и демонстрируют перераспределение потока ЦИ в отличие от традиционного варианта распределения ЦИ.

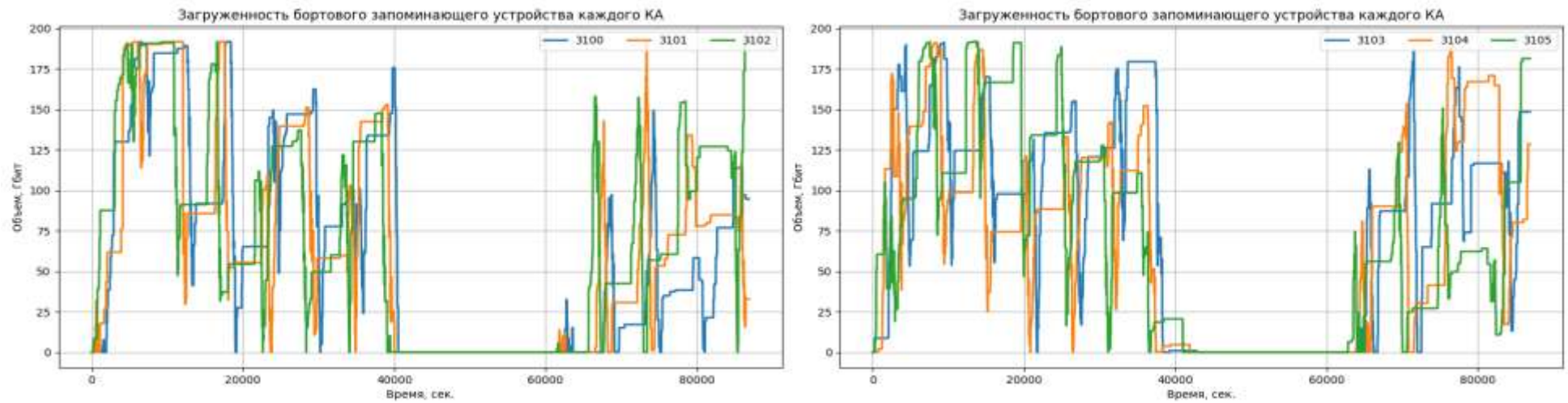
В таблицах 4.36 и 4.37 продемонстрированы данные о количестве целевых операций работы ЦА при рассмотрении возможности ретрансляционного распределения ЦИ, а также среднего времени передачи на НКИ соответственно.



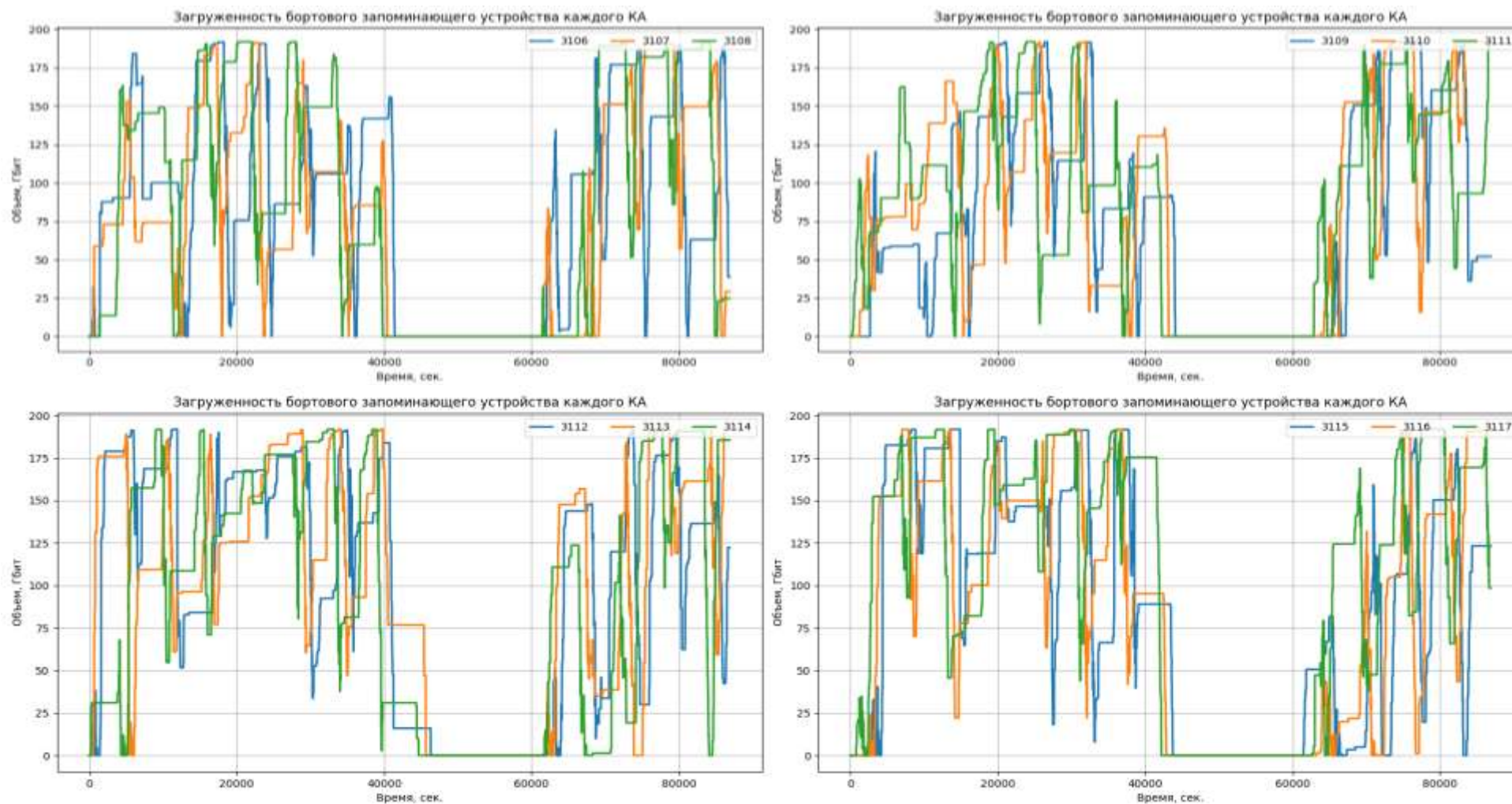
а)



б)
Рисунок 4.28 – Загруженность МЛС, а) – для КА 3100 - 3111, б) – для КА 3112 - 3117



а)



б)

Рисунок 4.29 – Загруженность БЗУ КА, а) – для КА 3100 - 3105, б) для КА 3106 - 3117

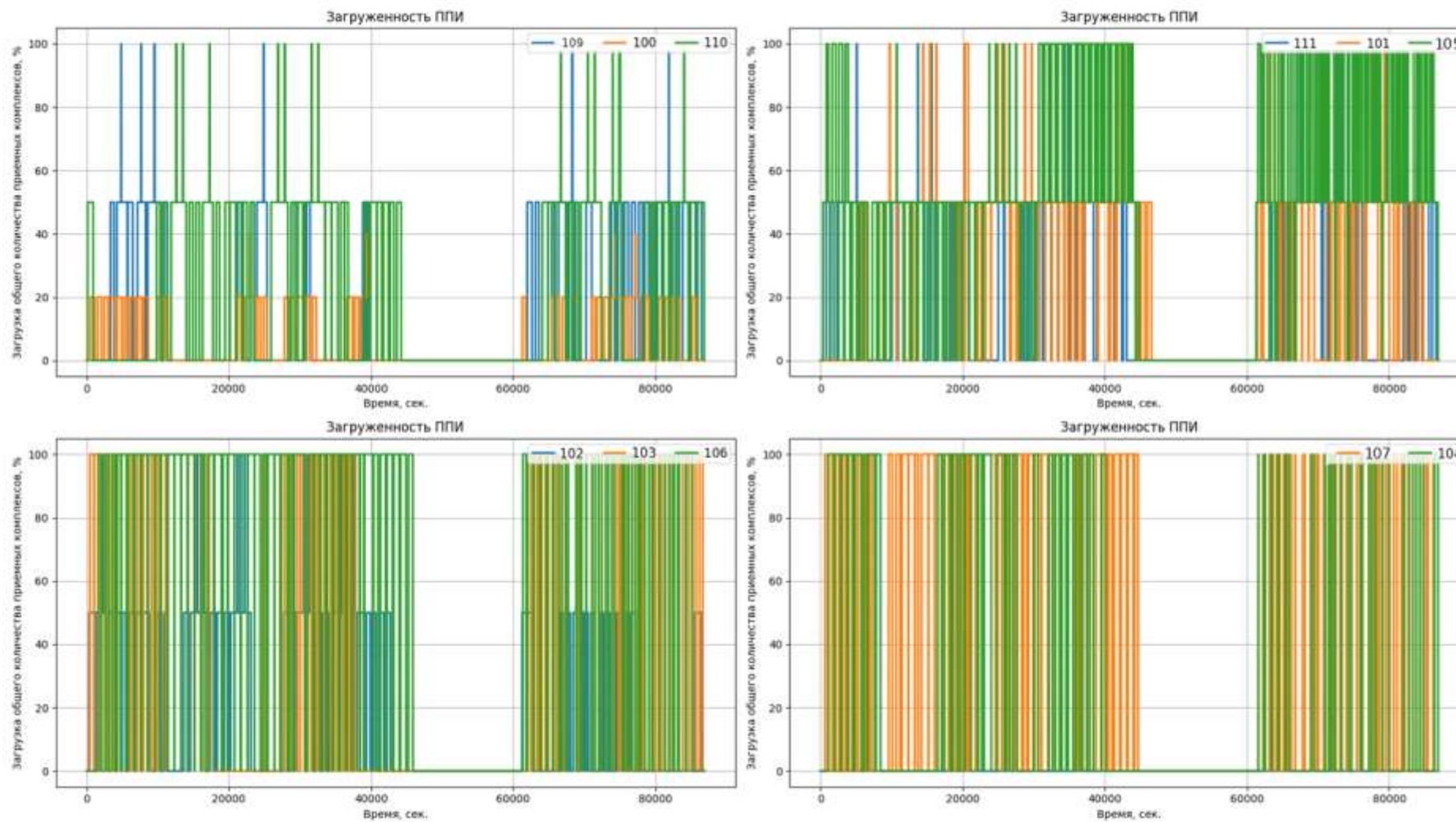


Рисунок 4.30 – Загруженность приемных средств ППИ

Таблица 4.36 – Количество возможных интервалов работы ЦА съемки каждого КА по результатам проведенного моделирования, ретрансляционный вариант распределения ЦИ, 18 КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	367	334	91
2.	3101	380	338	88.94
3.	3102	356	310	87.07
4.	3103	350	332	94.85
5.	3104	368	350	95.1
6.	3105	354	324	91.52
7.	3106	434	398	91.7
8.	3107	429	393	91.6
9.	3108	441	365	82.76
10.	3109	470	407	86.59
11.	3110	482	439	91.07
12.	3111	469	425	90.61
13.	3112	485	434	89.48
14.	3113	503	441	87.67
15.	3114	494	411	83.19
16.	3115	447	377	84.34
17.	3116	451	397	88.02
18.	3117	528	447	84.65
ИТОГО		7808	6922	88.65

Результаты моделирования ОГ КА из 18 КА с распределением ЦИ с возможностью ретрансляции данных по МЛС (без возможности записи данных в БЗУ «промежуточных» КА) демонстрируют:

- увеличение общего объема выполнения предложенных на этапе планирования маршрутов съемок 88.65 % при ретрансляционном распределении против 86.68 % при традиционном;
- уменьшение среднего времени передачи ЦИ на НКИ в 1.08 раз;
- средняя загруженность наземно-космических линий связи в период планирования возросла с 26.75 % до 31.12 %, что объясняется повышением объемов ЦИ с моделируемой ОГ.

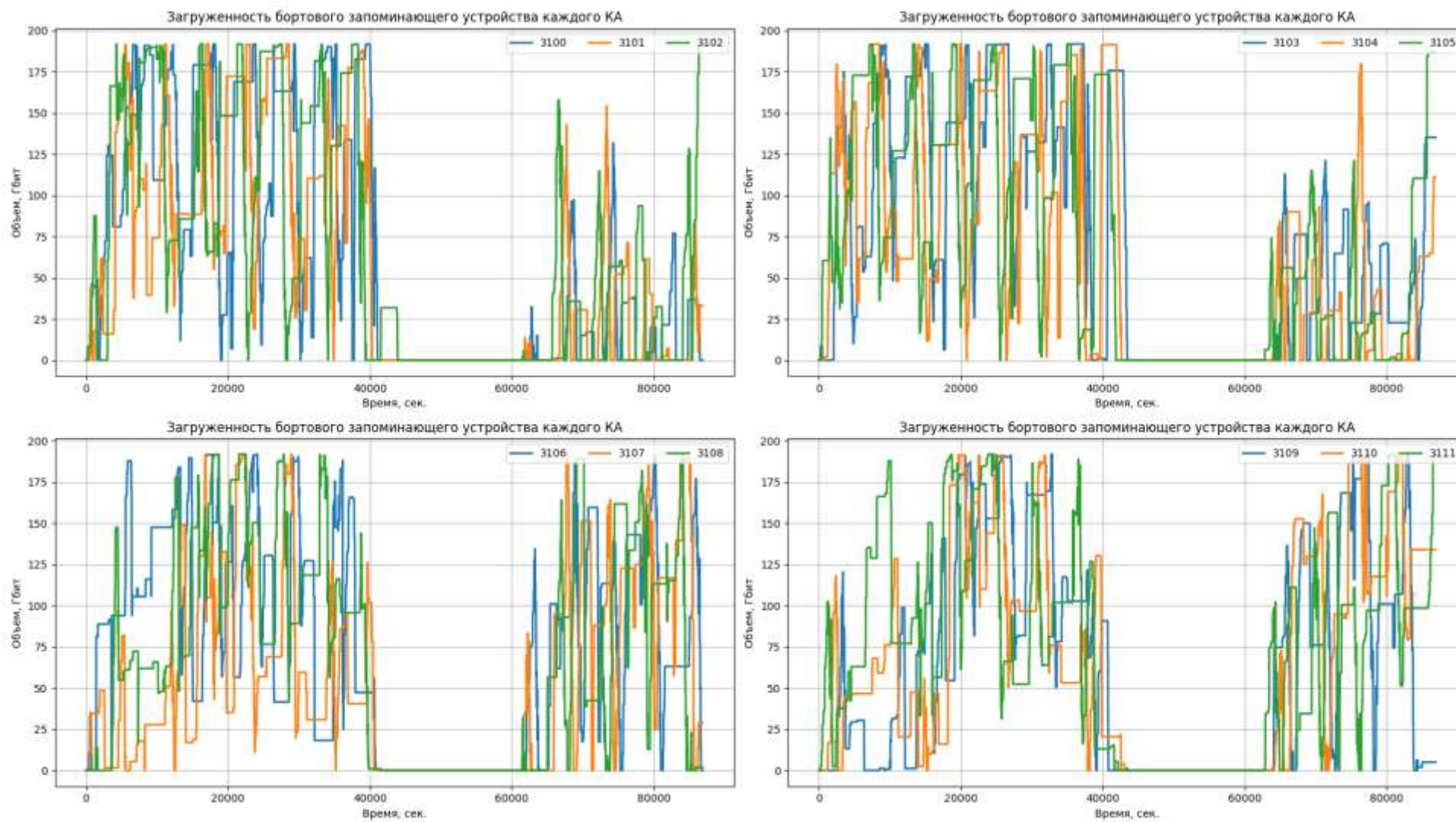
Таблица 4.37 – Среднее время передачи ЦИ, ретрансляционный вариант распределения, 18 КА

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, сек.
1.	3100	2226.37
2.	3101	2138.08
3.	3102	2289.06
4.	3103	2299.6
5.	3104	2255.35
6.	3105	2012.57
7.	3106	2204.7
8.	3107	2329.44
9.	3108	2490.54
10.	3109	2424.63
11.	3110	2781.94
12.	3111	2440.15
13.	3112	2927.26
14.	3113	3230.16
15.	3114	3567.12
16.	3115	2440.65
17.	3116	2480.97
18.	3117	3318.76
Для всех КА		2547.635

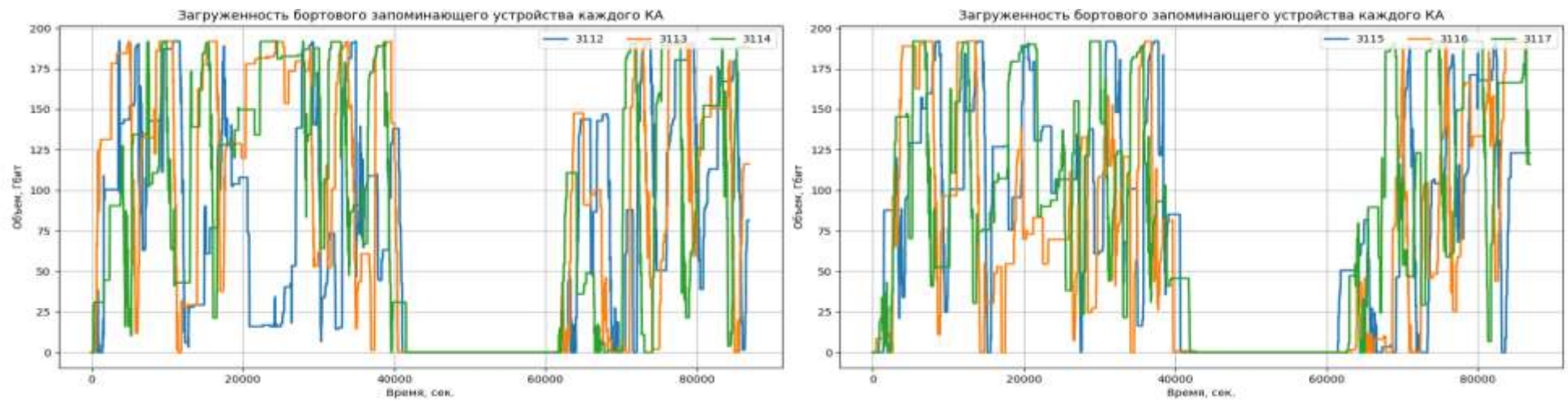
4.2.10 Вариант распределения целевой информации с возможностью передачи данных по МЛС с использованием БЗУ КА для ОГ из 18 КА

На рисунках 4.31 – 4.33 представлены графики загруженности БЗУ каждого КА, загруженности МЛС и приемных средств ППИ по результатам моделирования распределения ЦИ при доступных МЛС между всеми КА в ОГ, а также возможности сохранения ЦИ в «промежуточных» КА.

Полученные результаты демонстрируют повышение загруженности БЗУ каждого КА в отдельности, а также значительное повышение загруженности МЛС по сравнению с прошлыми вариантами.

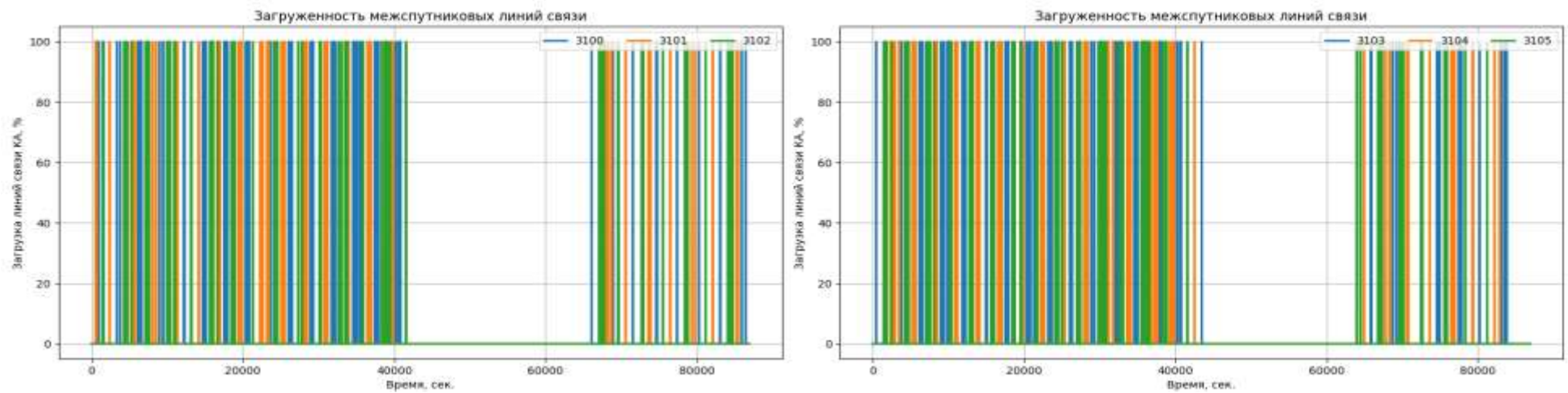


a)

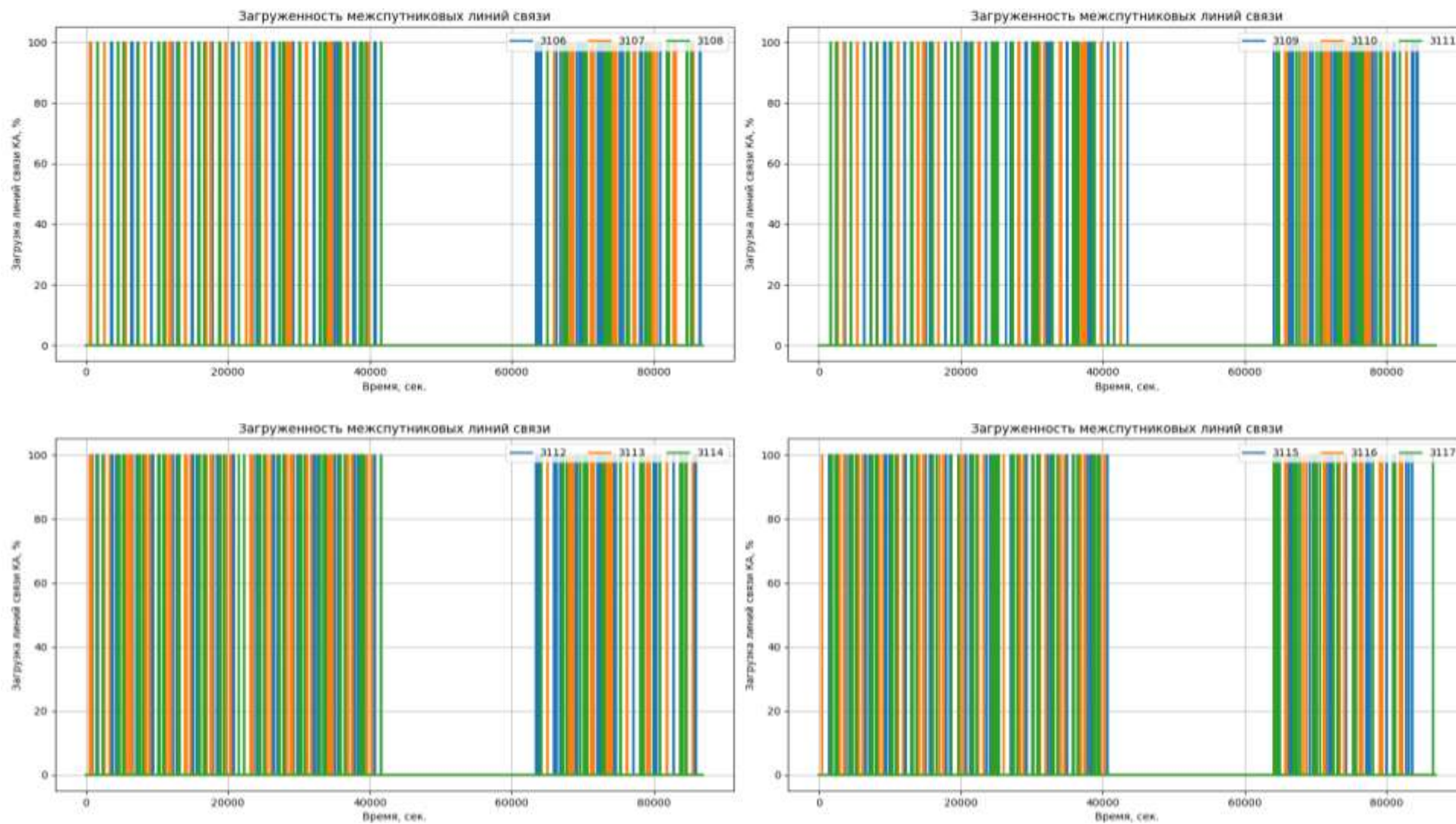


б)

Рисунок 4.31 – Загруженность БЗУ КА, а) – для КА 3100 - 3111, б) – для КА 3112 - 3117



а)



б)

Рисунок 4.32 – Загруженность МЛС, а) – для КА 3100 - 3105, б) – для КА 3106 - 3117

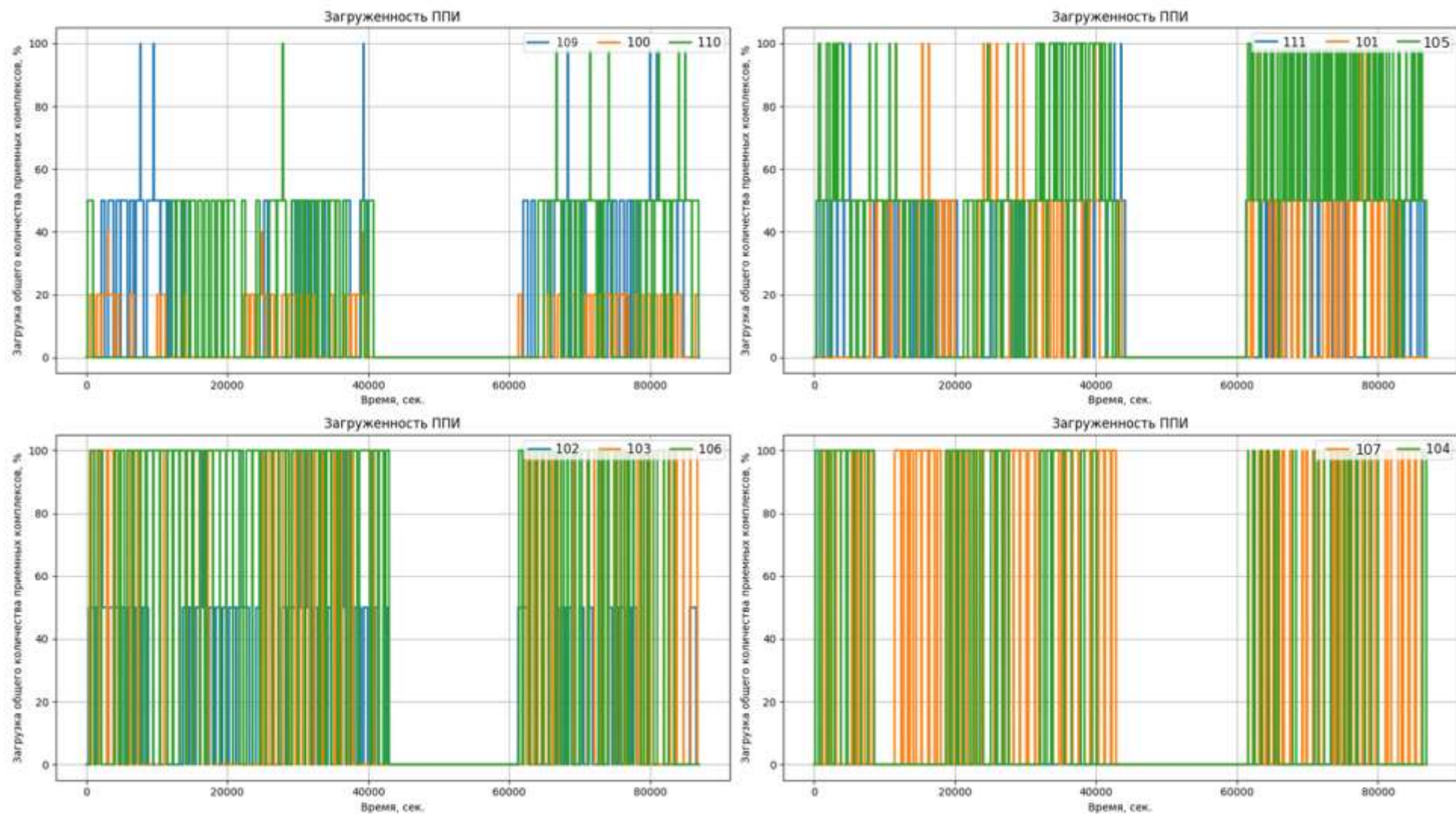


Рисунок 4.33 – Загруженность приемных средств ППИ

В таблицах 4.38 и 4.39 представлены результаты моделирования по количеству возможных интервалов работы ЦА съемки, утвержденных с учетом загруженности всей системы, а также среднего времени доставки данных на НКИ при распределении ЦИ с доступной межспутниковой связью и сохранением ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА.

Таблица 4.38 – Количество целевых операций ЦА съемки при распределении ЦИ с доступной межспутниковой связью и сохранением ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА, 18 КА

№	Код КА	Всего предложенных интервалов работы ЦА, шт.	Утвержденных интервалов работы ЦА, с учетом распределения информационных потоков, шт.	Процент выполнения предложенных целевых операций работы ЦА
1.	3100	367	338	92.09
2.	3101	380	354	93.15
3.	3102	356	313	87.92
4.	3103	350	318	90.85
5.	3104	368	344	93.47
6.	3105	354	317	89.54
7.	3106	434	414	95.39
8.	3107	429	406	94.63
9.	3108	441	388	87.98
10.	3109	470	400	85.1
11.	3110	482	416	86.3
12.	3111	469	417	88.91
13.	3112	485	422	87.01
14.	3113	503	374	74.35
15.	3114	494	385	77.93
16.	3115	447	405	90.6
17.	3116	451	394	87.36
18.	3117	528	402	76.13
ИТОГО		7808	6807	87.17

Моделирование ОГ КА из 18 КА при распределении ЦИ с доступной межспутниковой связью и сохранением ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА демонстрирует:

– общий объем выполнения предложенных на этапе планирования маршрутов съемок равен 87.17 %, что ниже аналогичного показателя при ретрансляционном варианте распределения в ОГ из 18 КА;

- уменьшение среднего времени передачи ЦИ на НКИ в 1.14 раз чем при ретрансляционном распределении;
- средняя загруженность наземно-космических линий связи на период планирования составляет 28.66 %, что ниже, чем при ретрансляционном распределении.

Таблица 4.39 – Среднее время передачи данных при распределении ЦИ с доступной межспутниковой связью и сохранением ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА, 18 КА

№	Код КА	Среднее время передачи данных от КА до ППИ, сек.
1.	3100	2655.23
2.	3101	2014.4
3.	3102	2412.55
4.	3103	2151.39
5.	3104	1759.63
6.	3105	1886.43
7.	3106	2037.99
8.	3107	1796.05
9.	3108	2365.36
10.	3109	2578.4
11.	3110	2534.96
12.	3111	2296.72
13.	3112	2450.7
14.	3113	2238.62
15.	3114	2500.55
16.	3115	2265.112
17.	3116	1623.55
18.	3117	2585.28
Для всех КА		2230.72

4.3 Выводы по разделу

Экспериментальная отработка проведена на 9 различных вариантах конфигурации, различающихся между собой количеством КА в ОГ, а также наличием межспутниковой связи и возможности записи ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА. На рисунке 4.34 приведено графическое представление среднего времени передачи данных от КА до ППИ для всех смоделированных вариантов.

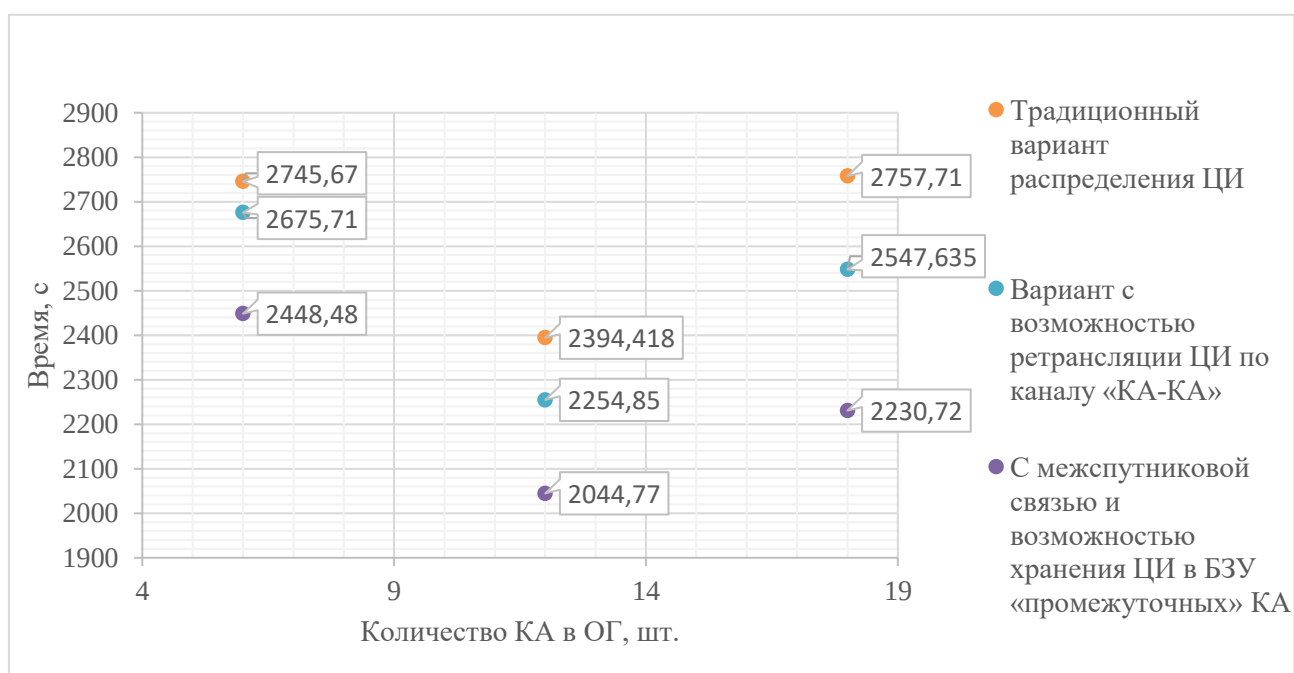


Рисунок 4.34 – Среднее время передачи данных от КА до ППИ

Полученные результаты характеризуют среднюю оперативность при штатной работе всей системы и демонстрируют значительное увеличение оперативности при использовании МЛС в различных орбитальных построениях. При этом использование МЛС в орбитальных построениях с наиболее частыми ЗРВ между парами КА оказывают большее воздействие на оперативность доставки ЦИ всей системы.

На рисунке 4.35 отображена гистограмма объемов произведенной ЦИ в различных моделях распределения, где 100 % для каждой моделируемой ОГ КА означает объем данных при традиционном варианте распределения ЦИ.

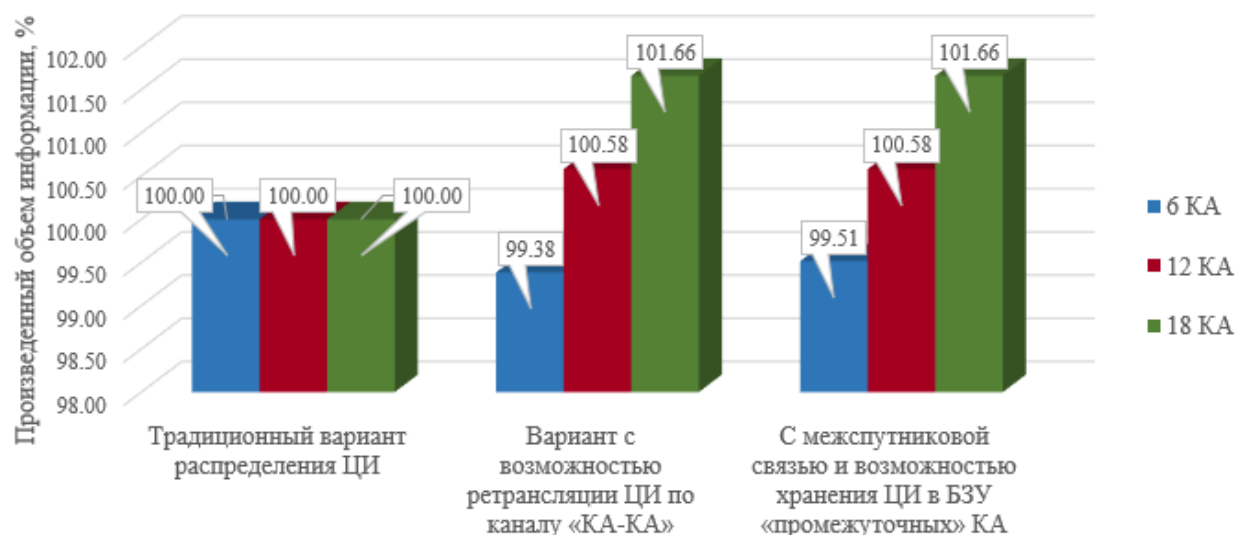


Рисунок 4.35 – Общий объем произведенной ЦИ в зависимости от различных вариантов распределения с учетом загруженности всей системы

Полученные данные общего объема произведенной ЦИ демонстрируют понижение объемов ЦИ при использовании МЛС для существующего типа ОГ КА «Канопус» и повышение объемов при использовании равномерного распределения КА на нескольких орбитальных плоскостях, что говорит о невозможности раскрытия потенциала использования МЛС при использовании существующего типа построения.

На рисунках 4.36 и 4.37 показаны общие графики загруженности каждого «узла» моделируемых систем для наземного и космического сегмента соответственно. Загруженность космического «узла» (КА) предполагает выполнение всех возможных маршрутов съемки, а наземного «узла» (ППИ) – полную загруженность всех ПК на всем периоде планирования.

Полученные результаты демонстрируют невозможность значительно загрузить наземный сегмент моделируемыми ОГ, наиболее загруженный ППИ при ОГ из 18 КА занят чуть более чем на половину своего ресурса (63.26 %). При этом каждый КА из моделируемых ОГ показывает высокий уровень загруженности своих ресурсов, достигающих в пике до 95.57 %.

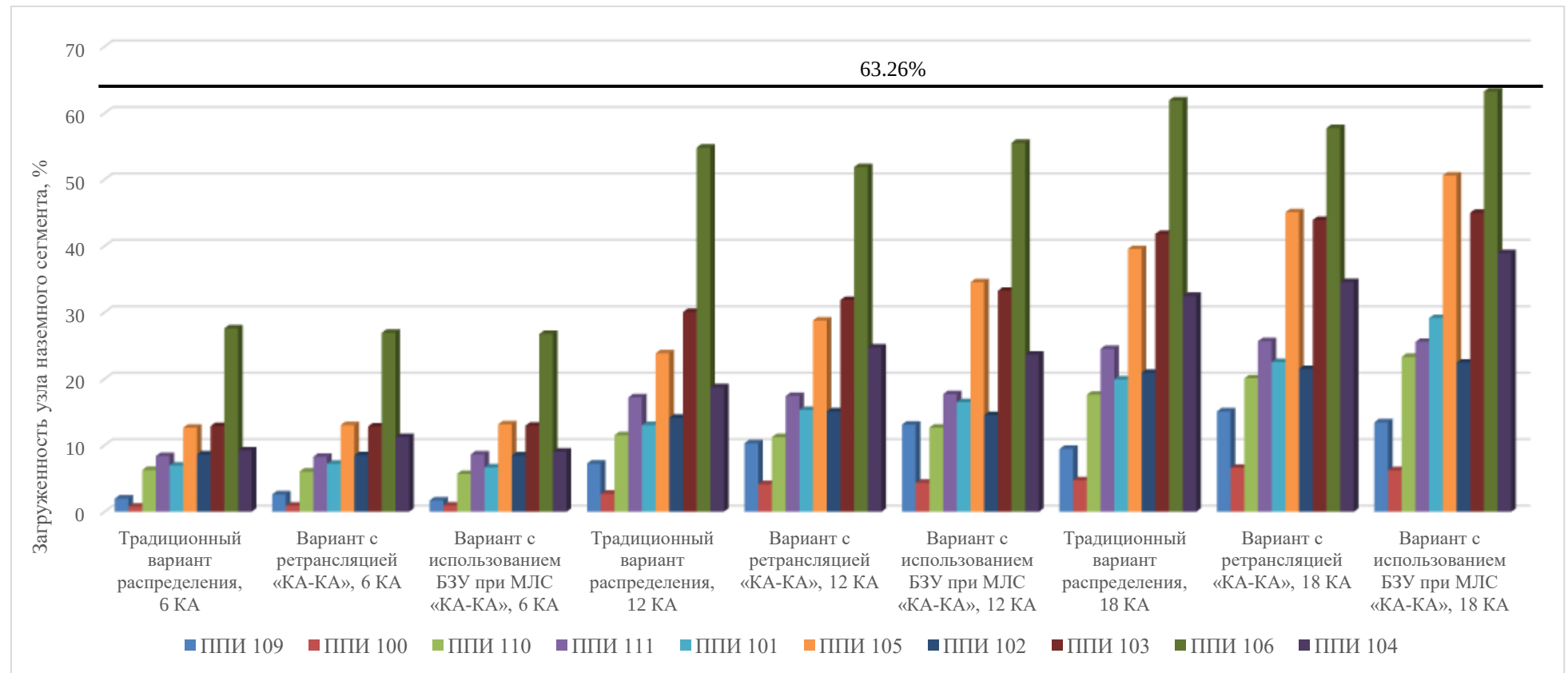


Рисунок 4.36 – Общая загруженность наземного сегмента при различных вариантах распределения ЦИ

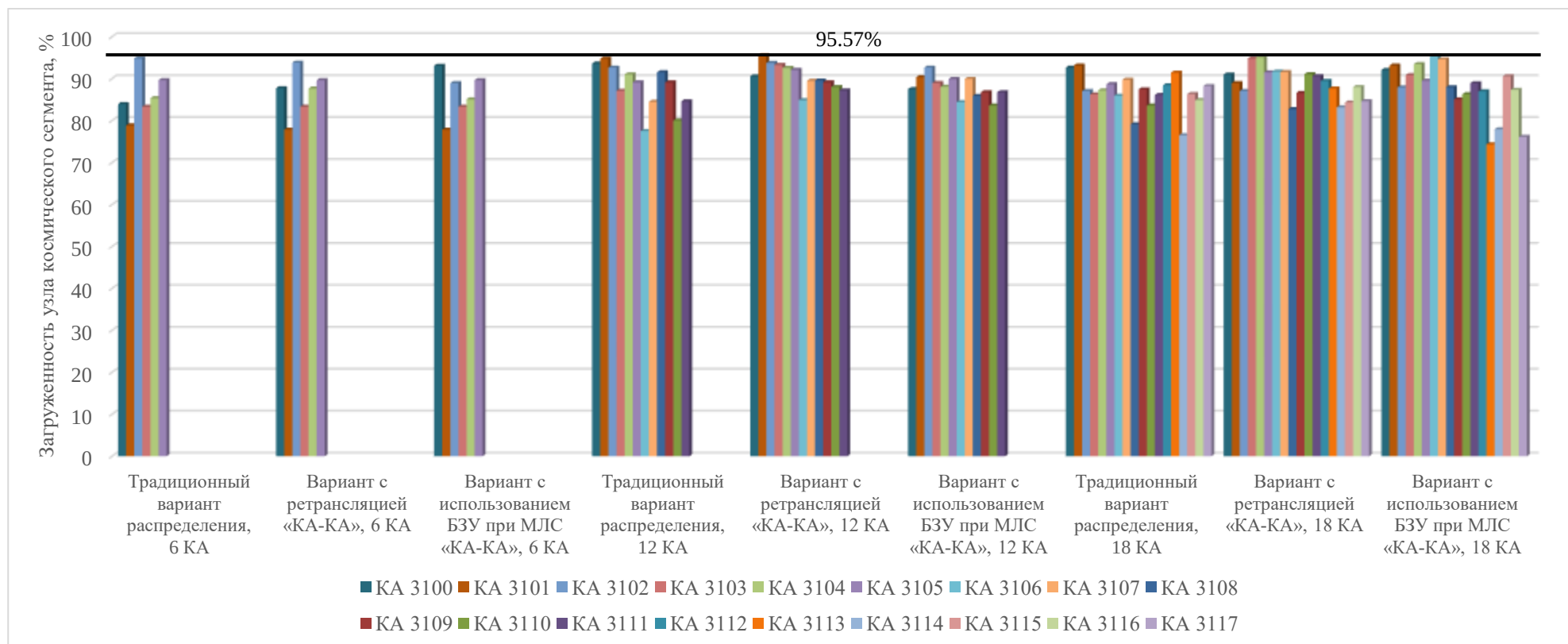


Рисунок 4.37 – Общая загруженность космического сегмента при различных вариантах распределения ЦИ

На рисунке 4.38 графически представлено среднее выполнение возможных съемок при работе различных ОГ КА ДЗЗ, позволяющих оценить эффективность различных моделей распределения ЦИ.

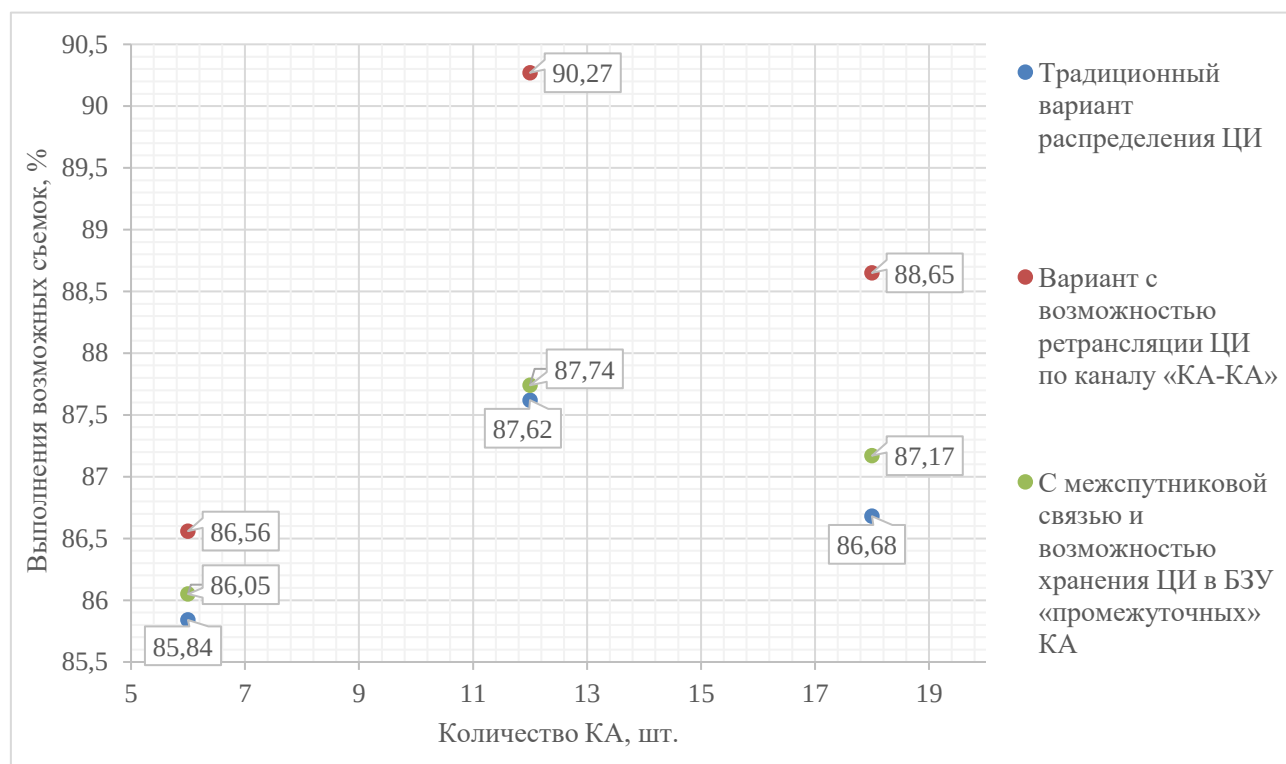


Рисунок 4.38 – Усредненное выполнение возможных съемок при работе заданной ОГ КА в различных вариантах распределения ЦИ и количества КА в ОГ

Графическое представление демонстрирует общее выполнение возможных целевых операций съемки, запланированных без учета информационного распределения в системе, где 100 % будет показывать максимальную загруженность заданной ЦА съемки. Результаты показывают повышенную эффективность использования моделей с распределением ЦИ по МЛС, при этом стоит отметить значительное повышение количества маршрутов съемки при использовании ретрансляционного варианта распределения.

В общем же случае, моделирование различных вариантов ОГ КА демонстрирует значимость использования МЛС для передачи ЦИ при увеличении количества орбитальных плоскостей и / или КА в них.

Эффективность использования МЛС напрямую зависит от характеристик линий связи, таких как скорость, точность наведения и дальность, а также от взаимного расположения КА на орбите.

Отдельно стоит выделить следующие результаты моделирования:

- адекватность разработанных алгоритмов планирования и распределения информационных потоков, учет всех заданных систематизированных ограничений алгоритмом;
- необходимость пересмотра уже существующих и отработанных на реальных системах методов распределения КА на орбите. Смоделированный цифровой аналог ОГ из 6 КА типа «Канопус» не позволяет полностью раскрыть доступный потенциал МЛС;
- увеличение оперативности при использовании МЛС с записью ЦИ в БЗУ «промежуточных» КА, немногим меньше увеличение оперативности демонстрирует и ретрансляционный метод распределения ЦИ;
- возможность значительного уменьшения конфигурации ПК на моделируемой НКИ или же использование части средств в качестве резервирования потоков данных;
- ретрансляционный метод распределения позволяет добиться большего потока ЦИ при передаче с КА на ППИ.

5 Заключение

В диссертации поставлена и решена важная научно-практическая задача повышение эффективности работы со сверхбольшими, постоянно растущими объемами информации в космическом сегменте системы ДЗЗ. Методологическую основу работы составляют методы системного анализа динамики полёта, теории управления, теории графов, оптимального управления, а также методы подготовки и обработки информации. Программная реализация разработанных моделей и алгоритмов выполнена с применением принципов объектно-ориентированного программирования. В ходе исследования получены следующие наиболее значимые научные и практические результаты:

1. Проведен анализ проблем существующих КС ДЗЗ при использовании большого количества КА ДЗЗ. Проведен анализ возможности использования МЛС при различных видах реализации, который демонстрирует низкую экономическую эффективность использования система типа МКСР «Луч», и значительное повышение эффективности всей системы при дополнительной комплектации каждого КА системы модулем межспутниковой связи.

2. Разработаны методы и алгоритмы совместного решения задач планирования наблюдений и ретрансляции целевой информации с учетом особенностей перспективных сетевых орбитальных группировок ДЗЗ в условиях высокой плотности объектов наблюдения

3. Предложен алгоритм системного взаимодействия перспективных сетевых группировок КА, а также разработаны соответствующие модели для последующей разработки программного обеспечения.

4. Разработана программно-математическая модель, позволяющая проводить комплексное моделирование перспективных сетевых космических группировок ДЗЗ, отличительной особенностью которой является возможность проводить моделирование сложных сетевых группировок, состоящих как из КА ДЗЗ, так и из спутников связи, которые возможно использовать для оперативной

передачи сверхбольших объемов целевой информации с КА на НКИ, а также выявления «узких» мест перспективной системы, что ранее не было реализовано в рамках научных работ подобного типа.

5. Программно-математическая модель и соответствующее СПО прошли экспериментальную отработку, а результаты частично сверены с СПО, используемым в Научном центре оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» для выполнения цикла задач комплексного целевого применения перспективных космических систем ДЗЗ, а также при моделировании процессов распределения информационных потоков между составными частями КС ДЗЗ.

6. Использование СПО на базе предложенных методов и алгоритмов позволяют определить наиболее рациональный состав и комплексные характеристики системы с целью повышения уровня оперативности выполнения заявок потребителей данных ДЗЗ, при этом, в качестве исходных данных используется баллистическая структура моделируемой группировки КА ДЗЗ, характеристики ЦА каждого КА, конфигурация МЛС и НКИ.

7. Экспериментальная отработка и моделирование различных вариантов ОГ и схем распределения информационных потоков «цифровой копии» реальной КС с большим количеством КА типа «Канопус» демонстрирует, что актуальная стратегия проектирования КС имеет низкую эффективность использования со значительно большим количеством КА, а также необходимость использования традиционных вариантов передачи информации с КА на НКИ. При этом, по мере наращивания КА ДЗЗ в ОГ значительно повышается эффективность использования МЛС для распределенной передачи данных, что значительно повышает эффективность использования всей системы.

Список сокращений и условных обозначений

АО	- акционерное общество
АО «НИИ ТП»	- акционерное общество «научно-исследовательский институт точных приборов»
АРМ	- автоматизированное рабочее место
АФУ	- антенно-фидерное устройство
БД	- база данных
БЗУ	- бортовое запоминающее устройство
ВР	- высокое разрешение
ВЭО	- высокоэллиптическая орбита
ГИС	- геоинформационная система
ГСР	- геостационарный спутник ретранслятор
ДЗЗ	- дистанционное зондирование Земли
ЕТРИС ДЗЗ	- единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли
ЗРВ	- зона радиовидимости
ИД	- исходные данные
ИИ	- искусственный интеллект
ИС	- информационная система
КА	- космический аппарат
КС	- космическая система
ЛВ	- линия визирования
МКС	- международная космическая станция
МЛС	- межспутниковые линии связи
НКИ	- наземная космическая инфраструктура
НР	- низкое разрешение
ОГ	- орбитальная группировка

ОЭА	- оптико-электронная аппаратура
ПК	- приемный комплекс
ППИ	- пункт приема информации
ПЭВМ	- персональная электронно-вычислительная машина
РПУ	- радиопрозрачное укрытие
РСА	- радар с синтезированной апертурой
СВР	- сверхвысокое разрешение
СПО	- специализированное программное обеспечение
СР	- среднее разрешение
ССО	- солнечно-синхронная орбита
США	- Соединенные Штаты Америки
ЦА	- целевая аппаратура
ЦИ	- целевая информация
BMP	- Bitmap Picture
ECHO	- Earth Observing System Clearinghouse
EDRS	- European Data Relay System
EOS	- Earth Observing System
EOSDIS	- Earth Observing System Data and Information System
ESA	- European Space Agency
INFEO	- Information on Earth Observation
LCT	- Laser Communication Terminal
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NSR	- Northern Sky Research
OPALS	- Optical Payload for Lasercomm Science
SILEX	- Semiconductor Intersatellite Link EXperiment
SSE	- Service Support Environment
TLE	- Two-Line Element set

WGS 84 - World Geodetic System 1984

Список литературы

1. Тюлин, А. Е. Рациональный вариант наращивания отечественной системы дистанционного зондирования Земли / А. Е. Тюлин, В. А. Селин, А. А. Емельянов [и др.] // Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 года. — Евпатория : Издательство МАИ-Принт, 2019. — С. 15–16. — EDN TBONPW.
2. Морозов, А. А. Исследование возможностей применения технологий управления потоками целевой информации в перспективных сетевых орбитальных группировках дистанционного зондирования Земли / А. А. Морозов // Научно-технический вестник Поволжья. — 2025. — № 8. — С. 89–96. — EDN BLXWCE.
3. Лешоко, А. В. Перспективы развития наземного комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли / А. В. Лешоко, В. Н. Осьминин, К. В. Киселев, В. А. Трегуб // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2018. — Т. 164, № 3. — С. 19–25. — EDN XYBJFJ.
4. Леонов, М. С. Наземный комплекс управления КА «Канопус-В» / М. С. Леонов, А. В. Круглов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 149, № 6. — С. 24–29. — EDN XXYSNP.
5. Емельянов, А. А. Проект «Цифровая Земля»: решения по созданию единого информационного пространства российской отрасли дистанционного зондирования Земли / А. А. Емельянов // Системный анализ, управление и навигация, Евпатория, 01–08 июля 2018 года. — Евпатория : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. — С. 171–172. — EDN XVECCL.
6. Емельянов, А. А. Мировые тенденции развития направления ДЗЗ. Российские приоритеты информационного обеспечения задач развития Арктической зоны РФ [Электронный ресурс] / А. А. Емельянов, Г. А.

- Ерохин, В. А. Селин // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г. — Москва : ИКИ РАН, 2024. — С. 6. — ISBN 978-5-00015-067-2. — DOI 10.21046/22DZZconf-2024a. — URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2024/10721.htm> (дата обращения: 19.09.2026).
7. Емельянова, А. В. Мировые тенденции развития наземной инфраструктуры космических систем дистанционного зондирования Земли / А. В. Емельянова, Н. П. Ковалевский, А. Л. Яровой // Космонавтика и ракетостроение. — 2021. — № 2 (119). — С. 151–163. — EDN CWSUAR.
 8. О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О космической деятельности» и Федеральный закон «О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» : Федеральный закон от 29.12.2025 № 540-ФЗ // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 19.09.2026).
 9. Колготинга, Т. А. Перспективы развития дистанционного зондирования Земли / Т. А. Колготинга // E-Scio. — 2021. — № 5 (56). — С. 477–480. — EDN ESLPAS.
 10. Вейко, А. В. Подходы к оценке экономической эффективности многоспутниковых группировок дистанционного зондирования Земли / А. В. Вейко, А. В. Блошенко // Антенны. — 2023. — № 6 (286). — С. 54–60. — DOI 10.18127/j03209601-202306-06. — EDN AVEYTC.
 11. Карташев, В. И. Подход к построению системы обработки открытых данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга наводнений с использованием технологий больших данных / В. И. Карташев, Ш. С. Фахми, А. А. Антонова, Я. В. Алексеенко // Космическая техника и технологии. — 2025. — № 1 (48). — С. 116–142. — EDN DNJOLG.
 12. Ламзин, В. А. Метод прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с оптико-

- электронной съемочной аппаратурой / В. А. Ламзин, В. В. Ламзин // Вестник Московского авиационного института. — 2021. — Т. 28, № 3. — С. 95–112. — DOI 10.34759/vst-2021-2-95-112. — EDN ELAZJT.
- 13.ГОСТ Р 70665-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Показатели эффективности : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 13.07.2023 № 521-ст : введен впервые : дата введения 2024-01-01 / разработан АО «Российские космические системы». — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — 24 с.
- 14.ГОСТ Р 70663-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Общие требования к созданию динамических и мозаичных покрытий : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 13.07.2023 № 519-ст : введен впервые : дата введения 2024-01-01. — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — 16 с.
- 15.Федоткин, Д. И. Автоматическая обработка данных космической съёмки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ / Д. И. Федоткин, Е. Н. Боровенский, Д. В. Сысенко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2024. — Т. 21, № 3. — С. 9–30. — DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30. — EDN HCODUZ.
- 16.Рудых, В. П. Подход к выбору рационального состава наземного комплекса приема целевой информации многоспутниковой системы ДЗЗ / В. П. Рудых, Ю. О. Хуртина // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 10–14 ноября 2025 года. — Москва : Институт космических исследований РАН, 2025. — С. 139. — EDN VQBQTD.

- 17.Васильев, А. И. Создание и практическая отработка программных технологий НКПОР российских КС ДЗЗ минимального состава / А. И. Васильев, М. В. Мешков, А. В. Кылов [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2024. — Т. 11, № 4. — С. 8–19. — EDN FHWFUA.
- 18.Старков, А. В. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Формализация задачи / А. В. Старков, А. А. Емельянов, Л. А. Гришанцева [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2021. — Т. 22, № 1. — С. 54–64. — DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64. — EDN EWFUYU.
- 19.Занин, К. А. Разработка методов выбора орбитального построения космической системы дистанционного зондирования Земли по критериям качества информации / К. А. Занин // Космонавтика и ракетостроение. — 2009. — № 3 (56). — С. 152–161. — EDN RDQHXN.
- 20.Емельянов, А. А. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А. А. Емельянов, В. В. Малышев, Ю. А. Смольянинов, А. В. Старков // Труды МАИ. — 2017. — № 96. — С. 11. — EDN ZWUHEB.
- 21.Емельянов, А. А. Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ / А. А. Емельянов, В. В. Малышев, А. В. Старков [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. — 2019. — № 8. — С. 28–31. — EDN QFXYNA.
- 22.Emelianov, A. A. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution / A. A. Emelianov, L. A. Grishantseva, K. I. Zubkova [et al.] // Advances in the Astronautical Sciences. — 2020. — Vol. 170. — P. 495–504. — EDN QUXMHN.

23. Старков, А. В. Разработка методики управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Старков Андрей Владимирович ; науч. рук. Малышев В. В. ; оппоненты: Баранов А. А., Кузнецов А. Е., Салмин В. В. — Москва : МАИ, 2019. — 338 с.
24. Малышев, В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления : учебное пособие для студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по специальности 160703 «Динамика полета и управление движением летательных аппаратов» направления подготовки дипломированных специалистов 160700 «Гидроаэродинамика и динамика полета» и специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах» направления подготовки дипломированных специалистов 230300 «Организационно-технические системы» / В. В. Малышев ; Федеральное агентство по образованию, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — Москва : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — 288 с. — ISBN 978-5-7035-2179-3. — EDN QJXDGH.
25. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов : учебное пособие для студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по специальностям: 161400 «Интегрированные системы летательных аппаратов», 161700 «Баллистика и гидроаэродинамика», профиль «Динамика полёта и управление аэрокосмическими системами», 220402 «Специальные организационно-технические системы», специализация «Управление и эффективность применения организационно-технических систем космического назначения» / В. Т. Бобронников, М. Н. Красильщиков, В. В. Малышев [и др.] ; под общей редакцией М. Н. Красильщикова, В. В. Малышева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Альянс, 2013. — 468 с. : ил., табл. — ISBN 978-5-91872-041-7.

26. Малышев, В. В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников [и др.] ; под редакцией В. В. Малышева. — Москва : Изд-во МАИ, 2000. — 568 с. — ISBN 5-7035-2384-2.
27. Космические системы дистанционного зондирования Земли / В. В. Малышев, Ю. А. Смольянинов, П. Е. Розин [и др.]. — Москва : Издательство «У Никитских ворот», 2023. — 388 с. — ISBN 978-5-00170-746-2. — EDN CWYPMR.
28. Бобронников, В. Т. Системный анализ и управление организационно-техническими системами : учебное пособие / В. Т. Бобронников, Д. А. Козорез ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — Москва : Изд-во МАИ, 2024. — 187 с. — ISBN 978-5-4316-1160-5.
29. Дарнопых, В. В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения / В. В. Дарнопых // Труды МАИ. — 2004. — № 16. — 15 с.
30. Дарнопых, В. В. Применение единого методического подхода к оперативному планированию целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи / В. В. Дарнопых // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2010. — № 1. — С. 118–137. — EDN LOIVCX.
31. Дарнопых, В. В. Синтез информационного тракта при планировании целевого функционирования космических систем наблюдения по критериям качества / В. В. Дарнопых, В. В. Ефанов, К. А. Занин, В. В. Малышев // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2010. — № 4. — С. 100–107. — EDN MTIZOV.
32. Усовик, И. В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого

- функционирования космических систем ДЗЗ / И. В. Усовик, В. В. Дарнопых // Труды МАИ. — 2013. — № 65. — С. 13. — EDN RBWGNF.
33. Лурье, И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 020501 «Картография», направления 020500 «География и картография» / И. К. Лурье ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Географический факультет. — Москва : КДУ, 2008. — 423 с. : ил., табл. — ISBN 978-5-98227-270-6. — EDN QKGPWP.
34. Малышев, В. В. Метод «уверенных суждений» при выборе многокритериальных решений / В. В. Малышев, С. А. Пиявский // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 5. — С. 90. — DOI 10.7868/S0002338815050091. — EDN UGEREX.
35. Голубев, С. И. Принятие решений в многокритериальных задачах на этапе обликowego проектирования авиационно-ракетной техники / С. И. Голубев, В. В. Малышев, С. А. Пиявский, К. И. Сыпало // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2020. — № 2. — С. 89–97. — DOI 10.31857/S0002338820020055. — EDN DPZCBW.
36. Способ управления целевым применением космических аппаратов дистанционного зондирования Земли : патент на изобретение 2828287 С1 Российская Федерация / А. В. Бондур, В. В. Егоров, В. А. Ковригин [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБУ «НИЦ «Планета». — № 2024127886 ; заявл. 21.12.2023 ; опубл. 08.10.2024, Бюл. № 28.
37. Ломов, А. Ю. Перспективы развития рынка космических систем ДЗЗ / А. Ю. Ломов // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. — 2012. — № 13. — С. 24–26. — EDN PBQGYR.
38. Селин, В. А. Основные направления развития аппаратуры и технологий ДЗЗ из космоса на основе анализа запусков КА ДЗЗ в мире / В. А. Селин, А. А. Кучейко, Е. А. Маносьева [и др.] // Материалы 21-й Международной

- конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13–17 ноября 2023 года. — Москва : Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. — С. 136. — EDN HAQMQE.
- 39.Пермяков, Р. В. Тенденции дистанционного зондирования Земли и итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2025 г. / Р. В. Пермяков // Геопрофи. — 2026. — № 2. — С. 8–13.
- 40.Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ и тенденции отрасли в 2024 году [Электронный ресурс] // Ракурс : официальный сайт компании. — URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/obshchie-voprosy/itogi-zapuskov-kosmicheskikh-apparatov-dzz-i-tendentsii-otrasli-v-2024-godu/> (дата обращения: 11.09.2026).
- 41.Волгин, Д. А. Перспективы развития группировки спутников дистанционного зондирования Земли в России / Д. А. Волгин // Молодой ученый. — 2024. — № 42 (541). — С. 30–32. — EDN TRRNCA.
- 42.Ерохин, Г. А. Современные подходы к управлению отечественными многоспутниковыми орбитальными группировками / Г. А. Ерохин, А. И. Жодзишский, Н. В. Рябогин, Р. В. Тишкин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2025. — Т. 12, № 3. — С. 3–11. — EDN YWXABS.
- 43.Лотов, К. И. Основные направления, актуальность и перспективы развития систем дистанционного зондирования / К. И. Лотов // Вестник науки. — 2025. — Т. 3, № 1 (82). — С. 1080–1091. — EDN EZINHW.
- 44.Егошкин, Н. А. Проектирование алгоритмов обработки данных высокодетальной радиолокационной съемки Земли на основе имитационного моделирования / Н. А. Егошкин, В. А. Ушенкин // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — Москва : ИКИ РАН, 2016. — URL:

http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5595
(дата обращения: 19.09.2026).

- 45.Егошкин, Н. А. Отработка технологий первичной, вторичной и тематической обработки радиолокационной информации на основе имитационного моделирования процесса функционирования космического РСА / Н. А. Егошкин, А. Э. Москвитин, В. А. Ушенкин [и др.] // 7-я международная научно-техническая конференция «К. Э. Циолковский — 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» : тезисы докладов, Рязань, 04–06 октября 2017 года. — Рязань : Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. — С. 405–408. — EDN ZIDBDT.
- 46.ГОСТ Р 70155-2022. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Типовые режимы съемки космического аппарата оптико-электронного наблюдения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 27.10.2022 № 1199-ст : дата введения 2023-02-01 / разработан АО «Российские космические системы». — Москва : Российский институт стандартизации, 2022. — 12 с.
- 47.ГОСТ Р 59754-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Обработка данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.11.2021 № 1509-ст : введен впервые : дата введения 2022-05-01 / разработан АНО ВО «Университет Иннополис» по заказу Госкорпорации «Роскосмос». — Москва : Российский институт стандартизации, 2021. — 12 с.
- 48.«Роскосмос» представил новый нацпроект по развитию космоса [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7800562> (дата обращения: 11.09.2023).

49. Стратилатова, Н. Н. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными телескопическими комплексами / Н. Н. Стратилатова, В. И. Куренков, А. С. Кучеров, А. С. Егоров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2016. — Т. 15, № 2. — С. 80–89. — DOI 10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89.
50. ГОСТ Р 70778-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типовые артефакты оптических данных : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 16.10.2023 № 1137-ст : дата введения 2024-04-01 / разработан АО «Российские космические системы» по заказу Госкорпорации «Роскосмос». — Москва : Российский институт стандартизации, 2023. — 24 с.
51. Абрамов, Н. С. Разработка и исследование методов сжатия данных дистанционного зондирования Земли / Н. С. Абрамов, О. Г. Шишкин // Современные наукоемкие технологии. — 2021. — № 5. — С. 9–13. — DOI 10.17513/snt.38650. — EDN AIANPV.
52. Алаторцев, К. В. Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / К. В. Алаторцев, В. Л. Алаторцев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2023. — Т. 24, № 4. — С. 295–304. — DOI 10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304. — EDN UWBYIW.
53. Контейнеры Аэроспейс Кэпитал успешно осуществили отделение 33 спутников на орбите [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.aerospacecapital.ru/ru/news14.html> (дата обращения: 11.09.2026).

54. Главное. Нацпроект по космосу представлен на ЦИПР-2025 [Электронный ресурс] // Госкорпорация «Роскосмос». — URL: <https://www.roscosmos.ru/41565/> (дата обращения: 14.09.2026).
55. Да будет связь. Роскосмос формирует две низкоорбитальных группировки спутников [Электронный ресурс]. — URL: <https://zakupki-digital.ru/jekskljuziv/da-budet-svjaz-roskosmos-formiruet-dve-nizkoorbitalnyh-gruppirovki-sputnikov/> (дата обращения: 14.09.2026).
56. Белый, А. А. Перспективы развития технологий ЕТРИС ДЗЗ / А. А. Белый, П. А. Лошкарев, С. В. Пушкарский // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России : сборник информационных материалов (научно-практический журнал). — 2022. — № 1. — С. 40–49.
57. Шевчук, Р. Б. Комплексы приема информации с российских спутников ДЗЗ / Р. Б. Шевчук // Геоматика. — 2012. — № 2. — С. 66–76. — EDN SUOAST.
58. Пермяков, Р. В. «Новый космос»: глобальный ландшафт и модели коммерциализации / Р. В. Пермяков // Экономика космоса. — 2023. — Т. 2, № 4 (6). — С. 12–28. — DOI 10.48612/agat/space_economics/2023.02.06.02. — EDN WJCMEJ.
59. Азаренко, Л. Г. Состояние и перспективы развития отечественного и зарубежных рынков сбыта космических услуг / Л. Г. Азаренко // Сервис plus. — 2011. — № 2. — С. 80–88. — EDN NTXRMF.
60. Марков, А. Н. Технология создания бесшовного сплошного покрытия территории России по данным космических аппаратов «Канопус-В» / А. Н. Марков, А. И. Васильев, А. В. Крылов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2024. — Т. 21, № 5. — С. 97–115. — DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-5-97-115. — EDN TUQCWB.
61. Подчуфаров, А. А. Методика разработки алгоритмов управления группой космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А. А. Подчуфаров, А. В. Фомичев // Известия Тульского государственного

- университета. Технические науки. — 2021. — № 9. — С. 150–156. — DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-150-156. — EDN ZMETTE.
62. Васильев, А. И. Особенности технологий онлайн предоставления мозаичных сплошных покрытий российских КА ДЗЗ / А. И. Васильев, П. А. Синяев, Н. А. Ольшевский, А. А. Пестряков // Информация и космос. — 2024. — № 2. — С. 132–140. — EDN DHNSXY.
63. Кирилин, А. Н. Космический аппарат «Ресурс-П» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Н. Р. Стратилатов [и др.] // Геоматика. — 2010. — № 4. — С. 23–26. — EDN STYSXR.
64. Ахметов, Р. Н. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П» / Р. Н. Ахметов, И. И. Зинина, А. А. Юдаков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2020. — Т. 17, № 3. — С. 41–47. — DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-3-41-47. — EDN PMEDHJ.
65. Кирилин, А. Н. Космическая система дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Г. П. Аншаков [и др.] // XL Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов, Москва, 26–29 января 2016 года. — Москва : Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2015. — С. 350. — EDN VXJZSX.
66. Галкин, Ю. С. Современное состояние и тенденции развития техники и технологий дистанционного зондирования Земли / Ю. С. Галкин, В. С. Шалаев, А. Н. Кравченко // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2008. — № 1. — С. 106–112. — EDN ISCIKD.
67. Селин, В. А. Тенденции развития систем межспутниковой связи для КА ДЗЗ / В. А. Селин, А. А. Кучейко, А. В. Борисов [и др.] // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 10–14 ноября 2025 года. —

- Москва : Институт космических исследований РАН, 2025. — С. 141. — EDN WIUSAH.
- 68.Гарбук, С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон. — Москва : Издательство «А и Б», 1997. — 296 с. — ISBN 5-89227-002-7. — EDN VVQQOL.
- 69.Алексеев, А. С. Спутниковое дистанционное зондирование Земли: глобальные тенденции и опыт Китая / А. С. Алексеев, Д. И. Мацук // *Universum: технические науки*. — 2025. — № 11-4 (140). — С. 5–9. — DOI 10.32743/UniTech.2025.140.11.21219. — EDN UGVJHE.
- 70.Российские космические системы. В РКС разработали сетевую архитектуру для управления перспективными спутниковыми группировками [Электронный ресурс]. — URL: <https://russianspacesystems.ru/2018/08/23/v-rks-razrabotali-setevuyu-arkhitektur> (дата обращения: 27.05.2026).
- 71.Галузин, В. А. Мультиагентные технологии для управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов / В. А. Галузин, А. В. Галицкая, П. О. Скобелев // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции. В 4 т. Т. 3, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. — Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2023. — С. 136–138. — EDN EWHADO.
- 72.Чернышев, С. А. Проблемы мультиагентных систем и возможные пути их решения / С. А. Чернышев // *Вестник Российского нового университета*. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. — 2023. — № 3. — С. 231–241. — DOI 10.18137/RNU.V9187.23.03.P.231. — EDN DWJCWP.
- 73.Потопкин, А. Ю. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования / А. Ю. Потопкин, Ю. А. Тимофеев, С. А. Волков // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. —

2021. — Т. 8, № 3. — С. 11–19. — DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19. — EDN UHKKDT.
74. Малышев, В. В. Планирование целевого функционирования орбитальной группировки КА ДЗЗ с использованием генетического алгоритма / В. В. Малышев, Ю. А. Смольянинов, А. В. Старков // Системный анализ, управление и навигация, Евпатория, 01–08 июля 2018 года. — Евпатория : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. — С. 183–186. — EDN XVECDZ.
75. Управление потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли / А. А. Емельянов, В. В. Малышев, Ю. А. Смольянинов, А. В. Старков. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. — 232 с. — ISBN 978-5-4316-0756-1. — EDN NFXLDE.
76. Коннов, И. В. О скаляризации векторных задач оптимизационного типа / И. В. Коннов // Известия высших учебных заведений. Математика. — 2012. — № 9. — С. 8–18. — EDN PABHXX.
77. Аунг Мью Тант. Планирование наблюдений в космических системах дистанционного зондирования Земли в условиях сложной объектовой обстановки / Аунг Мью Тант, А. А. Морозов, Най Хтет Линн, А. В. Старков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2026. — № 2. — С. 97–107. — DOI 10.7868/S3034644426020085. — EDN PUDGKN.
78. Малышев, В. В. Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи / В. В. Малышев, В. В. Дарнопых. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. — 296 с. — ISBN 978-5-4316-0444-7. — EDN YPAEYB.
79. Болкунов, А. И. Комплексная оценка эффективности навигационных спутниковых систем / А. И. Болкунов, М. Н. Красильщиков, В. В. Малышев // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. —

2022. — № 3. — С. 139–156. — DOI 10.31857/S0002338822030039. — EDN WGKXTD.
80. Емельянов, А. А. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки / А. А. Емельянов, В. В. Малышев, Нгуен В. Х. Н., А. В. Старков // Научно-технический вестник Поволжья. — 2018. — № 2. — С. 74–79. — EDN THLCAP.
81. Воронцов, В. А. Системное проектирование космических десантных аппаратов / В. А. Воронцов, В. В. Малышев, К. М. Пичхадзе. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2021. — 256 с. — ISBN 978-5-4316-0859-9. — EDN EJEHSN.
82. Малышев, В. В. Оперативное планирование съемки региона разнотипными КА / В. В. Малышев, Ю. А. Смольянинов, А. В. Старков // Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 года. — Евпатория : Издательство МАИ-Принт, 2019. — С. 195–197. — EDN TVSQZH.
83. Дарнопых, В. В. Многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования орбитальных группировок систем дистанционного зондирования Земли на основе оперативного планирования / В. В. Дарнопых, В. В. Малышев, И. В. Усовик // Вестник Московского авиационного института. — 2014. — Т. 21, № 5. — С. 37–52. — EDN TGWHDH.
84. Дарнопых, В. В. Проблема оптимизации построения орбитальных группировок космических систем наблюдения и связи на основе оперативного планирования их целевого функционирования и ее формализация / В. В. Дарнопых, В. В. Малышев // Вестник Московского авиационного института. — 2013. — Т. 20, № 3. — С. 50–60. — EDN RCJLZF.
85. Федоткин, Д. И. Автоматическая потоковая обработка данных в интересах формирования высокоточной продукции ДЗЗ / Д. И. Федоткин, Д. В.

- Сысенко, Е. Н. Боровенский [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы XII Международной научной конференции, Красноярск, 09–12 сентября 2025 года. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2025. — С. 41–44. — EDN YPPEIV.
86. Карутин, С. Н. Разработка научно-методологических основ комплексной оценки эффективности навигационных систем / С. Н. Карутин, В. В. Малышев, А. И. Болкунов [и др.] // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. — 2021. — № 8. — С. 8–24. — EDN QUGXIK.
87. Комаровский, А. Ю. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А. Ю. Комаровский // III Молодежные чтения имени М. В. Келдыша : сборник трудов Научной конференции, Москва, 23–26 мая 2023 года / под общ. ред. И. В. Садовничей. — Москва : ООО «МАКС Пресс», 2023. — С. 76–88. — EDN KFZYJZ.
88. Заплетин, М. П. Планирование миссии космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе открытых исходных данных / М. П. Заплетин, А. Т. Жакыпов // XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов. Т. 1, Москва, 29 января – 01 февраля 2019 года. — Москва : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. — С. 127–129. — EDN YXARVZ.
89. Безняков, А. М. Методика оптимального планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме / А. М. Безняков, В. И. Горбулин, Д. Л. Каргу [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). — 2013. — № 1 (39). — С. 39–45. — EDN RRUWDF.

90. Павлов, Д. А. Алгоритмы планирования передачи данных от космических аппаратов на наземные станции / Д. А. Павлов, А. В. Кондуков, М. О. Субботин // Компьютерные инструменты в образовании. — 2025. — № 1. — С. 108–117. — EDN HISXVI.
91. Галузин, В. А. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов / В. А. Галузин, Е. В. Симонова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2018. — Т. 20, № 6-2 (86). — С. 344–351. — EDN WNIWKW.
92. Скобелев, П. О. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий / П. О. Скобелев, В. К. Скимунт, Е. В. Симонова [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 10 (171). — С. 60–70. — EDN VIZEEN.
93. Данилкин, А. П. Космическая система оперативного мониторинга земной поверхности на базе малых космических аппаратов / А. П. Данилкин, В. Н. Воронков, О. Ю. Казанцев // Космическая техника и технологии. — 2021. — № 1 (32). — С. 42–55. — DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-1-42-55. — EDN CWCGKJ.
94. Старков, А. В. Методология управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ. Часть 4. Сетевые орбитальные группировки / А. В. Старков, А. А. Морозов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2025. — Т. 26, № 3. — С. 227–244. — DOI 10.22363/2312-8143-2025-26-3-227-244. — EDN VWVXUJ.
95. Tracking and Data Relay Satellites (TDRS) [Электронный ресурс] // NASA. — URL: <https://www.nasa.gov/missions/tdrs/tracking-and-data-relay-satellite-tdrs-generations-of-spacecraft/> (дата обращения: 24.07.2026).
96. Сафронов, М. В. Высокотехнологичный комплекс дистанционного зондирования Земли: его работа и основные проблемы / М. В. Сафронов, М. Е. Рачина, Д. К. Симонов // Проблемы эффективного использования

- научного потенциала общества : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Т. 2, Тюмень, 13 января 2019 года. — Тюмень : ООО «Агентство международных исследований», 2019. — С. 174–178. — EDN YSVYHZ.
- 97.Leeb, W. R. Optical terminals for microsatellite swarms / W. R. Leeb, A. Kalmar, K. H. Kudielka, P. J. Winzer // Free-space laser communication technologies XIV : Proceedings of SPIE. — 2002. — Vol. 4635. — P. 202–214.
- 98.Nishinaga, N. Study for HDR cross-link for formation flight satellite systems / N. Nishinaga, Y. Takayama, T. Takahashi [et al.] // Free-Space Laser Communication Technologies XV : 28 January 2003, San Jose, California, USA. — Bellingham, WA : SPIE, 2003. — Vol. 4975. — P. 45–56. — DOI 10.1117/12.478937.
- 99.OPALS [Электронный ресурс] // NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). — URL: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/optical-payload-for-lasercommunication-science-opals/> (дата обращения: 24.07.2026).
- 100.Sbardellati, A. The communication payload of the ARTEMIS European satellite / A. Sbardellati, T. Sassorossi, M. Marinelli, R. Giubilei // 15th International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. — San Diego, CA, 1994. — AIAA-94-0905-CP. — P. 22–32. — DOI 10.2514/6.1994-905.
- 101.EDRS [Электронный ресурс] // DLR. — URL: <https://www.dlr.de/en/ar/topics-missions/communications-navigation/satellite-communications/edrs> (дата обращения: 28.07.2026).
- 102.EDRS [Электронный ресурс] // EDA. — URL: <https://eda.europa.eu/docs/documents/edrs> (дата обращения: 28.07.2026).
- 103.Pimentel, P. Martin. Four years operations of Inter-satellite (ISLs) and Space-Ground (SGLs) Optical links / P. Martin Pimentel, N. Hoepcke, C. Seiter [et al.] // 15th International Conference on Space Operations (SpaceOps 2018). — Marseille, France, 2018. — AIAA 2018-2475. — DOI 10.2514/6.2018-2475.

- 104.LIVE REAL TIME SATELLITE TRACKING AND PREDICTIONS [Электронный ресурс]. — URL: <https://n2yo.com/> (дата обращения: 26.09.2023).
- 105.Макриденко, Л. А. КА «Канопус-В» № 1 — первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования Земли нового поколения / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2017. — Т. 156, № 1. — С. 10–20. — EDN YWELEN.
- 106.ЕТРИС ДЗЗ [Электронный ресурс] // Научный центр оперативного мониторинга Земли. — URL: <https://ntsomz.ru/etris-dzz/> (дата обращения: 24.07.2026).
- 107.Лошкарев, П. А. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий / П. А. Лошкарев, О. О. Тохиян, А. М. Курлыков [и др.] // Геоматика. — 2013. — № 4. — С. 22–26. — EDN STYTTF.
- 108.Ромашкин, В. В. ЕТРИС ДЗЗ — современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса / В. В. Ромашкин, П. А. Лошкарев, Д. И. Федоткин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 3. — С. 220–227. — DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227. — EDN XBRGNR.

Приложение

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор проектов
по созданию систем ДЗЗ –
заместитель генерального конструктора
АО «Российские космические
системы», к.т.н.



А.А. Емельянов
2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Морозова Александра Андреевича

на тему «Управление потоками целевой информации перспективных сетевых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли в условиях высокой плотности объектов наблюдения» в технологический контур Оператора российских космических средств ДЗЗ

Комиссия в составе: Т.Д. Ганиной (председатель комиссии), Л.А. Гришанцевой (член комиссии), К.С. Емельянова (член комиссии), К.И. Жуковской (член комиссии) составила настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Морозова Александра Андреевича на тему «Управление потоками целевой информации перспективных сетевых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли в условиях высокой плотности объектов наблюдения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», внедрены в технологический контур Оператора космических средств ДЗЗ (Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»):

1. В рамках НИР «Разработка методов комплексного целевого применения перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли в интересах обеспечения российских потребителей космической информацией», шифр: НИР «Оператор ДЗЗ»:

- методы целевого применения перспективных российских космических комплексов (систем) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- результаты исследований, экспериментальной отработки и доработки методов комплексного целевого применения перспективных космических

комплексов (систем) ДЗЗ с использованием экспериментальных образцов составных частей технологического контура целевого планирования Оператора космических средств ДЗЗ.

2. В рамках ОКР «Создание национального центра дистанционного зондирования Земли из космоса», шифр: ОКР «Центр ДЗЗ»:

- результаты разработки и экспериментальной отработки перспективных технологий комплексного целевого применения орбитальной группировки космических аппаратов (ОГ КА) ДЗЗ;

- результаты моделирования процессов распределения информационных потоков по составным частям наземной космической инфраструктуры (НКИ) ДЗЗ для различных вариантов конфигурации системы и ее технических средств;

- результаты моделирования процессов планирования съемки для различных вариантов конфигурации ОГ КА ДЗЗ;

- результаты моделирования процессов обработки и хранения данных ДЗЗ для различных вариантов конфигурации НКИ ДЗЗ и ее технических средств;

- результаты моделирования функционирования НКИ ДЗЗ в случае отказа отдельных узлов;

- результаты моделирования функционирования НКИ ДЗЗ в случае максимальной загрузки технических средств для различных вариантов конфигурации системы.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



Т.Д. Ганина

Л.А. Гришанцева

К.С. Емельянов

К.И. Жуковская