

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Галузин Владимир Андреевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СОГЛАСОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
РАЗДЕЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ
УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Скобелев Петр Олегович

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Анализ задачи планирования работы группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли	16
1.1 Общие проблемы планирования орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли	16
1.2 Структура и функции космической системы ДЗЗ	20
1.3 Модель работы космической системы ДЗЗ	25
1.4 Постановка задачи	30
1.5 Выводы	33
2 Обзор методов и систем планирования миссий космических аппаратов дистанционного зондирования земли	34
2.1 Планирование работы одиночных космических аппаратов	34
2.2 Основные подзадачи планирования	36
2.3 Планирование работы орбитальных группировок	39
2.4 Программные системы управления ресурсами орбитальных группировок	42
2.5 Выводы	45
3 Разработка метода согласованного планирования заявок на съемку	48
3.1 Мультиагентной подход к решению задачи управления ресурсами комической группировки	48
3.2 Модель данных системы ДЗЗ	50
3.3 Метод согласованного планирования	52
3.4 Реакция на события	64
3.5 Выводы	65
4 Разработка прототипа цифровой платформы	66

4.1	Архитектура и функции цифровой платформы	66
4.2	Функциональные возможности и требования, предъявляемые к прототипу сервиса планирования.....	69
4.3	Архитектура прототипа сервиса планирования	70
4.4	Пользовательский интерфейс прототипа.....	72
4.5	Выводы	76
5	Экспериментальные исследования.....	77
5.1	Методика экспериментальных исследований	77
5.2	Исследование адаптивности.....	79
5.3	Исследование влияния порядка прихода заявок.....	81
5.4	Исследование производительности.....	82
5.5	Анализ эффективности в сравнении с известными методами планирования.....	84
5.6	Выводы	86
6	Практическое применение результатов работы.....	88
6.1	Проект разработки «Специализированное программное обеспечение информационной поддержки принятия решений по применению группировок космических аппаратов».....	88
6.2	Проект разработки платформы совместного использования в ресурсных центрах распределенных наземных станций приема данных с космических аппаратов.....	92
6.3	Выводы	99
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	101
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	102

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЛИСТИНГ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. НАБОР ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ФОРМАТЕ TLE.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ГАЛУЗИНА В.А. В НАО «ГРУППА КОМПАНИЙ «ГЕНЕЗИС ЗНАНИЙ».....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ГАЛУЗИНА В.А. В ООО «НПК «СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ».....	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Услуги по дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ) – одна из динамично развивающихся сфер космической отрасли, результаты которой находят все большее применение в сельском хозяйстве и военной сфере, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и других сферах [15, 83].

При этом наблюдается, с одной стороны, многократное увеличение количества поступающих заявок на съемку районов интереса (РИ) и повышение требований к качеству, оперативности и эффективности съемки. С другой стороны, растет число предложений малых космических аппаратов (МКА) от разных производителей, отличающихся своими функциональными и стоимостными возможностям. Примерами являются проекты компании Planet Labs (более 200 спутников), BlackSky Global (60 спутников ДЗЗ и 17 станций приема) [67], «Сфера» Роскосмоса на 600 МКА [22] и др.

Для повышения качества услуг для потребителей, агрегации разрозненных ресурсов и повышения эффективности ДЗЗ предлагается создание цифровой платформы управления группировками МКА разных производителей. Такая платформа призвана выполнять функции «космического юбера¹» рынка ДЗЗ, т.е. заменить собой посредников [46], позволяя потребителям через «одно окно» подавать запросы на съемку интересующих их РИ, согласованно использовать МКА и пункты приема информации (ППИ), переданные в управление платформе, и доставлять результаты ДЗЗ потребителями. Под согласованным планированием в данном контексте понимается процесс планирования, при котором итоговое расписание формируется на основе поиска баланса интересов между множеством конкурирующих и кооперирующих между собой элементов системы, каждый из которых «оптимизирует» свою целевую функцию (например, заказ «хочет» быть максимально быстро исполнен или ресурс «хочет» быть максимально загруженным), но готов идти на переговоры и уступки ради достижения своих целей в интересах общего [6]. Расписание целевого применения космической

¹ От «юберизация» – замена посредников (людей или организаций) цифровыми платформами

системы представляет собой совокупность моментов времени выполнения операция съемки РИ, передачи данных МКА и приема данных ППИ. Формируемая таким образом орбитальная группировка ДЗЗ (ОГ ДЗЗ) позволит повысить оперативность, гибкость, производительность, масштабируемость работы группировки как для потребителей, так и поставщиков техники и услуг, а также значительно снизить транзакционные издержки.

Ключевой проблемой создания такого рода цифровой платформы становится решение задачи согласованного планирования заказов на имеющиеся ресурсы ДЗЗ с учетом интересов, предпочтений и ограничений всех участников и на основе индивидуального подхода к планированию различных по своим ресурсам, возможностям и характеристикам МКА.

При этом число заявок на съемку ДЗЗ становится столь велико, что вручную это делать не представляется возможным, а в автоматическом режиме требуется учет особенностей заказов, МКА разных производителей и пунктов приема информации (ППИ). Более того, часто возникают ситуации, когда в начале дня рабочая программа для орбитальной группировки ДЗЗ формируется несколько часов и отправляется в центр управления полетами (ЦУП), после чего неожиданно поступают новые срочные заявки на съемку, требующие перестроения полученного решения, однако времени на это уже нет, или возникают большие задержки. В связи с этим требуется адаптивная коррекция плана работы МКА и станций для получения результата «здесь и сейчас» [13]

В России работы по автоматизации планирования работы космических аппаратов (КА) ДЗЗ выполняются в ряде организаций, создающих ракетно-космическую технику, в числе которых ФГУП «ЦНИИмаш», РКК «Энергия», РКЦ «Прогресс», НИИ ТП и ряд других [3, 24, 35, 28], но это обычно уникальные, крупные и специализированные КА, унификация планирования которых затруднена. Кроме того, в данных организациях решается задача планирования на один или несколько аппаратов, что другая задача. Эта задача решается классическими методами в сочетании с имитационным моделированием для 3-5 аппаратов, но с ростом их числа и увеличением числа заявок до сотен и тысяч, эти

методы и средства перестают быть применимы. Задача же согласованного планирования разделяемых ресурсов пока не ставилась и не решалась.

Кроме того, сама по себе проблема планирования проведения космической съемки орбитальной группировкой известна как NP-полная задача [71], для которой размерность пространства возможных решений стремительно растет с ростом числа ресурсов МКА и заказов. Каждый добавленный в систему МКА или ППИ умножает количество возможных вариантов решения. В этих условиях применение традиционных математических методов и средств планирования МКА, а также различного рода эвристик для уменьшения времени перебора (имитации отжига, поиска с запретами, генетические алгоритмы и т.д.) оказывается ограниченным [8]. Главными их недостатками являются трудность получения рационального решения с ростом размерности задачи, ориентация на централизованную схему работы и пакетный режим обработки заявок, жесткая детерминированность алгоритмов, не позволяющих адаптивно перестраивать планы по событиям, потеря адекватности расписаний с течением времени и др.

Идея создания альтернативных методов и средств планирования группировок МКА на основе мультиагентных технологий, была высказана А.В. Соллогубом и П.О. Скобелевым в 2010г [37]. В основу положена концепция сети потребностей и возможностей [7]. Полученные теоретические выводы и положения, а также первые результаты экспериментальных разработок и исследований по этому направлению, выполнявшиеся в период с 2010 года, представлены в [38, 39, 42, 84, 85]. В этом подходе каждая заявка и каждый МКА должен быть представлен программным агентом, способным реагировать на события, планировать свои действия, а также согласовывать свои решения с другими МКА. В качестве агентов потребностей выступают агенты заявок, а в качестве агентов возможностей – агенты МКА.

Как показано в разработках и исследованиях, проведенных в работах А.А. Жилиева создаваемая при этом мультиагентная система (МАС) планирования может строиться как самоорганизующаяся система с «роевым интеллектом», способная более гибко и адаптивно перестраивать планы под действием внешних

событий с учетом интересов всех участников. Вместе с тем, до настоящей работы были созданы лишь первые образцы МАС для оперативного управления группировками, включая несколько МКА и поток заказов в 300-500 заказов. В то же время разработки РКЦ «Прогресс» и ВНИИЭМ уже сегодня предполагают использование десятков МКА с десятками тысяч заказов на горизонте в 2-3 месяца, причем на съемку РИ ДЗЗ площадного типа, что требует существенного развития разработанных ранее моделей и методов и средств планирования.

За рубежом исследования по «Рою МКА» были начаты в то же время в работах К. Шиллинга (K. Schilling) [79, 82, 80] из Вюрцбургского университета (Германия). В настоящее время по этому направлению активно ведутся в ряде научных центров, например, в работах J. Bonnet, X. Wang, G. Picard, S. Phillips [43, 94, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 77] и ряде других. Однако, известные разработки не ориентированы на использование в цифровых платформах ДЗЗ с множеством заказчиков и поставщиков услуг МКА и ППИ, не учитывают возможность разделения ресурсов, рассматривают задачи объектовой съемки и не пригодны для площадных РИ, перестают быть применимы с значительным ростом числа заявок, МКА и ППИ.

В этой связи становится актуальной и значимой задача разработки новых методов и средств согласованного планирования разделяемых ресурсов для целевого применения крупномасштабных группировок МКА ДЗЗ.

Цели и задачи исследования – разработка методов и средств согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для повышения оперативности² выполнения заявок потребителей и получения изображений требуемого качества³.

² Под «оперативностью» понимается время, затраченное от момента поступления заявки в цифровую платформу – до момента получения требуемого изображения пунктом приема информации.

³ Под «качеством изображений» понимается отношение разрешения (м/пиксель) в полученном изображении к разрешению идеального изображения, зависящее от угла отклонения камеры МКА относительно надира (перпендикуляра, опущенного от космического аппарата к Земле).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести системный анализ и выявить особенности решения современных задач планирования целевого применения группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в цифровых платформах, обеспечивающих разделение ресурсов.

2. Описать новую постановку задачи согласованного планирования разделяемых ресурсов группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, применяемых для наблюдения точечных районов (объектовая съемка) и районов большой площади (площадная съемка).

3. Разработать метод согласованного планирования больших пакетов заявок (десятки тысяч) на объектовую и площадную съемку группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли посредством выявления и разрешения конфликтов по совместному использованию ресурсов аппаратов и пунктов приема информации.

4. Разработать функциональную архитектуру цифровой платформы и реализовать сервис планирования целевого применения группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

5. Выполнить исследование разработанных методов и средств и провести их сравнение с существующими методами планирования работы малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

6. Провести апробацию и внедрение разработанных методов и средств в организациях космической отрасли.

Методы исследования, используемые в диссертационной работе, основаны на принципах системного анализа, исследования операций, методах математического и имитационного моделирования, методе сопряженных взаимодействий в мультиагентных сетях потребностей и возможностей.

Достоверность результатов обеспечивается применением методологии системного анализа и исследования операций, сравнением результатов исследования с результатами традиционных методов и средств из известных источников, практическим использованием разработанного сервиса цифровой

платформы для решения задач управления целевым применением малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, сравнением результатов моделирования с результатами, полученными квалифицированными экспертами и специалистами профильных предприятий.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, предметом – методы и средства согласованного планирования большого числа разнородных заявок на объектовую и площадную съемку разделяемыми ресурсами группировок.

Научная новизна. Новые научные результаты, полученные в диссертации:

1. Предложена новая постановка задачи согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, от решаемой до настоящего времени на практике задачи независимого планирования космических аппаратов необходимостью согласованно планировать ресурсы орбитальных группировок разных производителей и возможностью разделения одного аппарата между несколькими заявками.

2. Разработан метод согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, отличающийся от ранее предложенного метода на основе сети потребностей и возможностей двухэтапной итерационной процедурой параллельной обработки запросов агентов для достижения «конкурентного равновесия», унификацией части расчетов и вынесением их на предварительные стадии, использованием принципа «ленивых вычислений»⁴, что обеспечивает разрешение конфликтов по совместному использованию разделяемых ресурсов, пакетную обработку большого числа заявок и работу с площадными районами интереса.

⁴ Под «ленивыми вычислениями» понимается стратегия вычислений, при которой расчеты выполняются только в момент времени, когда требуется результат, а не на всем горизонте планирования.

3. Разработана функциональная архитектура цифровой платформы управления группировкой малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, отличающаяся от используемых на практике систем управления космическими аппаратами интеграцией в единый контур сервисов согласованного планирования ресурсов орбитальных группировок и сети пунктов приема информации разных поставщиков, мониторинга выполнения миссии, обработки и хранения результатов съемки, что позволяет обеспечить полный цикл предоставления услуг дистанционного зондирования Земли потребителям от подачи заявки – до получения результатов.

4. Проведено исследование возможностей разработанных методов и средств и их сравнение с известными методами планирования, показавшее преимущества предлагаемого подхода для обработки 20 тысяч заявок на горизонте в 30 дней против 5 тысяч с применением известных методов на базе пакета OptaPlanner, т.е. в 4 раза больше, с повышением качества получаемых изображений на 5-15% в зависимости от размера выборки.

Практическая значимость. Результаты работы позволили:

1. Создать сервис согласованного планирования разделяемых ресурсов для цифровых платформ управления многоспутниковыми орбитальными группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, предоставляющих услуги объектовой и площадной съемки.

2. Обеспечить индивидуальный подход к каждой заявке и каждому аппарату в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, обеспечивая баланс «оперативность и качество» получения изображений.

3. Разработать цифровую платформу управления целевым применением группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для реализации всего жизненного цикла заявки (от поступления – до выдачи результатов), нашедшую применение для моделирования космических группировок РКЦ «Прогресс» и Сколковского института науки и технологий, управления аппаратами «Канопус» АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

4. Уменьшить сложность и трудоемкость управления группировками малых космических аппаратов и наземной инфраструктурой и сократить зависимость от «человеческого» фактора, допускающего ошибки в процессе принятия решений.

5. Результаты работы могут быть использованы при создании других цифровых платформ для работы с разделяемыми ресурсами: грузовыми перевозками, цехами производства, беспилотными летательными аппаратами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая постановка задачи согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

2. Метод согласованного планирования заявок на объектовую и площадную съемку в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

3. Функциональная архитектура цифровой платформы управления многоспутниковой группировкой малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на основе сервиса согласованного планирования разделяемых ресурсов, включая как сами аппараты, так и наземную инфраструктуру.

4. Результаты исследования разработанных методов и средств, показавшие возможность обработки до 20 тысяч заявок на дистанционное зондирование Земли для 30 малых космических аппаратов и существенные преимущества в сравнении с известными методами планирования по качеству результата и производительности вычислений.

5. Результаты апробации и внедрения разработанных методов и средств в организациях и предприятиях космической отрасли.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании систем управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и Сколковского института науки и технологий, в проекте Минобрнауки РФ 14.578.21.0230 «Разработка моделей, методов и средств сетевого взаимодействия для построения группировок аэрокосмических систем

дистанционного зондирования Земли для решения задач точного земледелия», уникальный ID номер RFMEFI57817X0230, выполненному в ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и АО «РКЦ «Прогресс», и в проекте «Разработка информационной технологии (платформы) совместного использования в ресурсных центрах распределенных наземных станций приема данных с космических аппаратов» реализованного при поддержке Фонда содействия инновациям (договор №371ГРНТИС5/42688).

Апробация работы. Основные положения и научные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 16 – 18 апреля 2018 г.); Международная конференция «Информационные технологии в управлении» (г. Санкт-Петербург, 6 – 8 октября 2020 г.); 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Vienna, Austria, 4 – 6 February 2021); VII Международная конференция «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 20 – 24 сентября 2021); 19th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-agent Systems (Salamanca, Spain, 6 – 8 October 2021); 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Online, 3 – 5 February 2022).

Основные публикации. Результаты опубликованы в 17 научных работах, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК, 8 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 4 работ – в трудах международных и всероссийских конференций и получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 96 источников. Текст занимает 112 страниц основной части, содержит 43 рисунка, 7 таблиц и 7 приложений объемом 18 страниц.

Краткое содержание работы. В первой главе рассмотрена задача управления ОГ МКА ДЗЗ, приведено теоретико-множественное описание объекта исследования и предложена новая постановка задачи согласованного планирования

МКА ДЗЗ, входных и выходных данных, критериев планирования и имеющихся ограничений.

Во **второй главе** выполнен обзор существующих методов планирования ресурсов ОГ ДЗЗ. Проведен анализ ограничений каждого метода для разработки сервиса согласованного планирования, и поставлена задача разработки нового метода для цифровой платформы управления группировками МКА ДЗЗ.

В **третьей главе** описывается разработанный метод для обработки заявок на объектовую и площадную съемку в группировках МКА ДЗЗ в пакетном режиме, но с сохранением возможности адаптивного согласованного перестроения плана по событиям. В ходе разработки предложенная ранее мультиагентная модель сети потребностей и возможностей для управления ОГ МКА ДЗЗ была модифицирована для обеспечения пакетного режима работы сервиса согласованного планирования и обработки большого числа заявок, причем с возможностью распараллеливания вычислений при наличии нескольких ядер процессора. При этом рассматриваются такие заявки на съемку РИ, которые могут быть удовлетворены только несколькими МКА на разных витках, т.е. обеспечивается как конкуренция, так и кооперация МКА.

В **четвертой главе** приводится функциональная архитектура разработанной цифровой платформы с описанием функций основных модулей, а также показывается реализация сервиса планирования.

В **пятой главе** приводится описание проведенных экспериментальных исследований с целью оценки характеристик разработанных методов и средств для решения поставленной задачи и их сравнения с известными методами планирования по качеству и производительности решения.

В **шестой главе** приводится описание разработки и внедрения разработанного сервиса согласованного планирования и прототипа платформы для решения задач управления группировками МКА «Канопус», которые решались по заказу компании АО «СТТ групп» в интересах АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Разработанный сервис позволил моделировать различные варианты конфигурации

ОГ и планировать пакеты до 20 тысяч заказов на съемку на горизонте до 4 недель, включая объектовую и площадную съемку.

Разработанный сервис использовался также при разработке платформы управления пунктами приема информации и прошел испытания на площадке Сколковского института науки и технологий для планирования приема данных от МКА, запущенных при поддержке Фонда содействия инновациям в научно-технической сфере в августе 2022 года.

1 АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В данной главе рассматривается задача управления ОГ МКА ДЗЗ, приводится теоретико-множественное описание объекта исследования и предлагается новая постановка задачи согласованного планирования МКА ДЗЗ, входных и выходных данных, критериев планирования и имеющихся ограничений.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [11, 13, 15].

1.1 Общие проблемы планирования орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли

В последние десятилетия ведется активная разработка и развертывание космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) нового поколения, состоящих из разнородной орбитальной группировки базирующихся на КА малой весовой размерности и распределённой сети наземных ППИ. Орбитальная группировка может включать в себя от нескольких десятков - до сотен космических аппаратов (КА) [67, 22]. Снимки и продукты, получаемые данными компаниями, используются заказчиками из правительственных, промышленных, некоммерческих и научных кругов.

Группировка МКА обладает рядом преимуществ перед одним большим и тяжелым космическим аппаратом [34, 26, 1]:

- Надежность. При выполнении задания съемки РИ средствами нескольких идентичных МКА выход из строя одного из них не является критичным в силу дублирования функций отдельных аппаратов.
- Технологическая актуальность. Состав орбитальной группировки изменяется постепенно. Каждый запуск выводит на орбиту аппараты, которые замещают запущенные ранее МКА, выработавшие свой ресурс.

- Оперативность съемки. Группировки МКА обладают большим временным разрешением, что дает возможность максимально оперативно получать информацию о заданном районе наблюдения.

- Сжатые сроки создания. Сокращение производственного цикла связано с узкой специализацией аппарата, использованием серийных компонентов и унифицированных платформ.

- Ценовая привлекательность. Стоимость создания МКА ДЗЗ значительно меньше стоимости аналогичного большого КА.

Рассматриваемые возможности ДЗЗ позволяют решать важные государственные задачи в интересах социально-экономического развития страны [4, 29].

Основными характеристиками снимков, полученных в результате дистанционного зондирования, влияющими на оценку их качества, являются пространственное, спектральное, радиометрическое и временное разрешения. Пространственное разрешение – минимальная угловая или линейная величина изобразившегося объекта местности, зафиксированная пикселем. Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон съемки при многозональной и гиперспектральной съемке. Радиометрическое разрешение определяется числом уровней сигнала, которые сенсор может регистрировать. Временное разрешение характеризуется частотой пролета КА над РИ. В зависимости от задач проводимых исследований, к съемке ДЗЗ предъявляются различные требования по периодичности и пространственному разрешению [16], как показано на рисунке 1.1.

Следствием увеличения размерности и производительности орбитальной группировки является рост требований, предъявляемых к алгоритмам и системам планирования. Так для КС, состоящей из десятков КА и ППИ, может требоваться составление плана тысяч точечных РИ на значительном горизонте, причем время размещения новых заявок на съемку должно измеряться в минутах с момента их поступления.

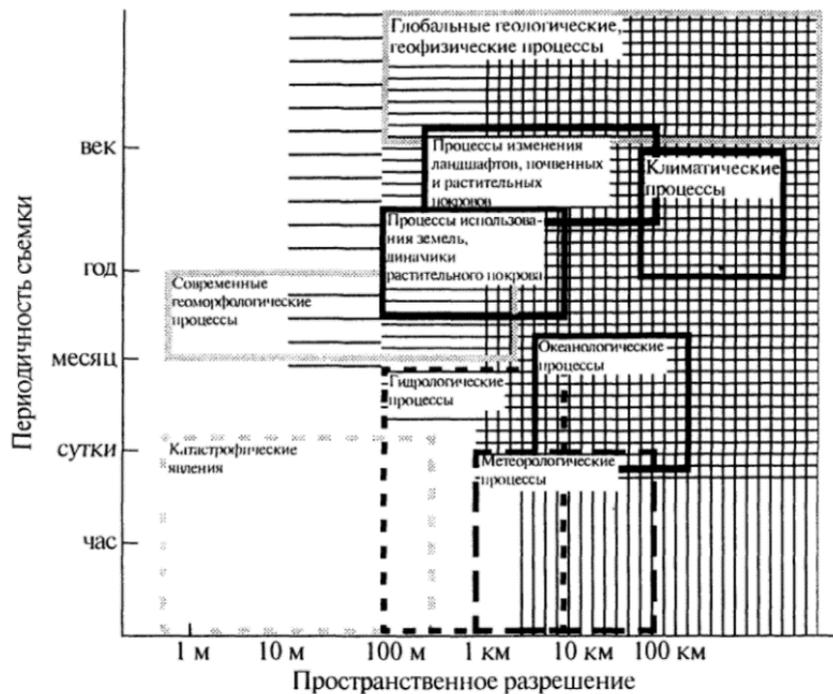


Рисунок 1.1 – Требования к периодичности съемки и пространственному разрешению в зависимости от задач исследования

Кроме того, повышение требований к оперативности обслуживания заявок на съемку РИ обуславливает необходимость в динамической адаптивной корректировке расписания работы ОГ ДЗЗ по мере поступления в систему новых заявок на съемку в реальном времени или в случае возникновения непрогнозируемых событий, связанных с отказом оборудования или быстроменяющейся метеорологической обстановкой [8].

В сложившейся практике МКА одного производителя управляются специальным расчетом операторов, которые ведут только свои спутники и которому отправляют заказы свои заказчики. Чтобы решить, на каком из возможных МКА лучше выполнять заявку, потребитель должен опросить каждого оператора и сделать свой выбор, а операторы должны сделать попытку перестроить планы своих работ и найти возможность встроить новую заявку, возможно, разрешая конфликты с уже принятыми ранее заявками (Рисунок 1.2).

Перспективный подход связывается с созданием цифровых платформ, которым в управление передаются МКА разных производителей для работы в режиме разделения ресурсов, когда один МКА может выполнять заявки от разных потребителей (Рисунок 1.3).

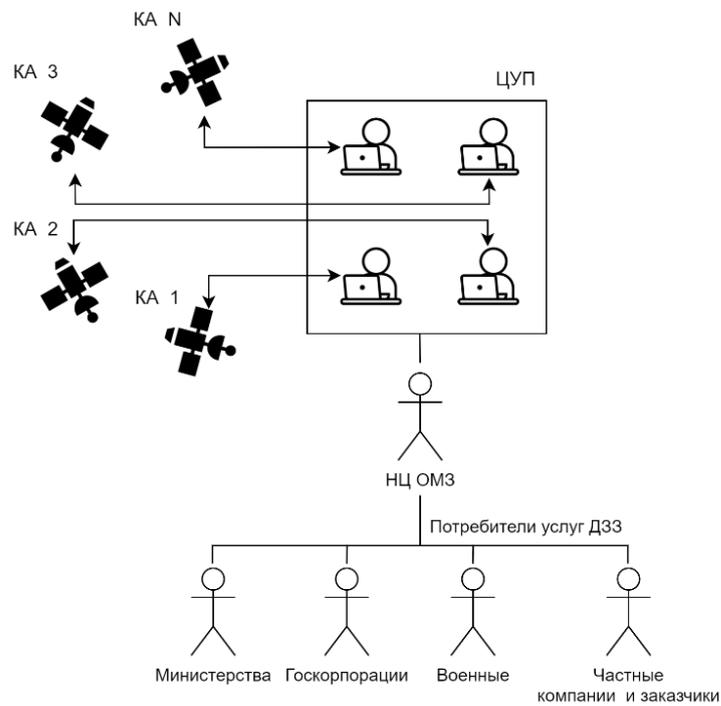


Рисунок 1.2 – Текущая схема взаимодействия потребителей с поставщиками услуг ДЗЗ

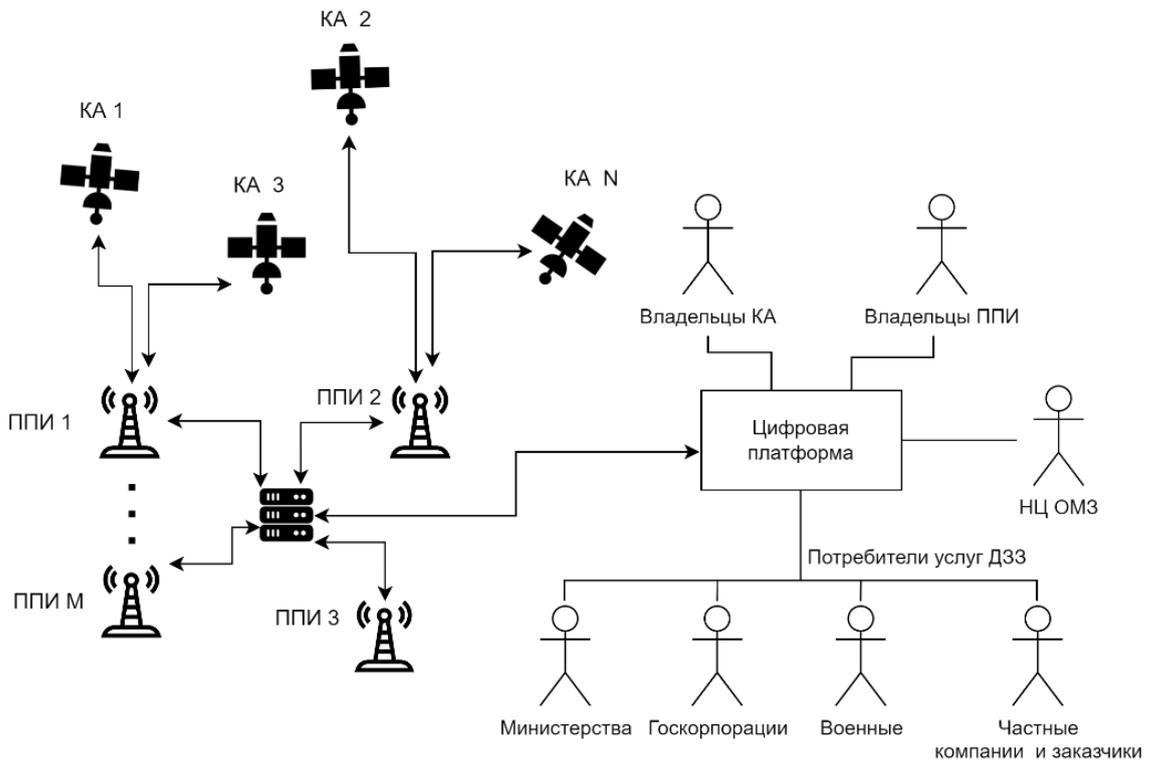


Рисунок 1.3 – Перспективная схема взаимодействия потребителей с поставщиками услуг ДЗЗ при помощи средств цифровой платформы

1.2 Структура и функции космической системы ДЗЗ

Рассмотрим основные компоненты ОГ ДЗЗ. Система состоит из совокупности функционально взаимосвязанных КА и наземных технических средств, предназначенных для решения целевых задач (Рисунок 1.4) [41]. В ее состав входят:

- орбитальная группировка КА (ОГ КА);
- наземный комплекс управления (НКУ);
- наземный комплекс приема и обработки информации ДЗЗ;
- комплекс планирования и обработки информации ДЗЗ.



Рисунок 1.4 – Поток данных системы ДЗЗ

В состав НКУ входят:

- командно-измерительные пункты (КИП), рассредоточенные по территории РФ и предназначенные для обмена контрольной и управляющей информацией с КА группировки;
- центральный командный пункт (ЦКП), который выполняет основные функции по руководству и координации работ, связанных с управлением КА, а

также всех служб и средств при запусках и решении задач обеспечения полета и функционирования КА;

– центральный пункт управления (ЦПУ), который осуществляет управление КА – вырабатывает решения по управлению КА на основе оперативной оценки состояния систем КА по оперативной информации, поступающей с КИП.

Для приема, обработки и анализа поступающей информации ДЗЗ от КА служит наземный комплекс приема и обработки информации, который включает в себя ППИ.

Комплекс планирования и обработки информации реализует функции Оператора системы. В данном комплексе реализуются задачи наземного планирования работы аппаратуры ДЗЗ на различные горизонты времени, формируется массив рабочей программы бортовой аппаратуры ДЗЗ и других систем, осуществляется закладка рабочей программы на борт КА.

На рисунке 1.5 показана схема съемки РИ КА и передачи полученных данных на Землю.

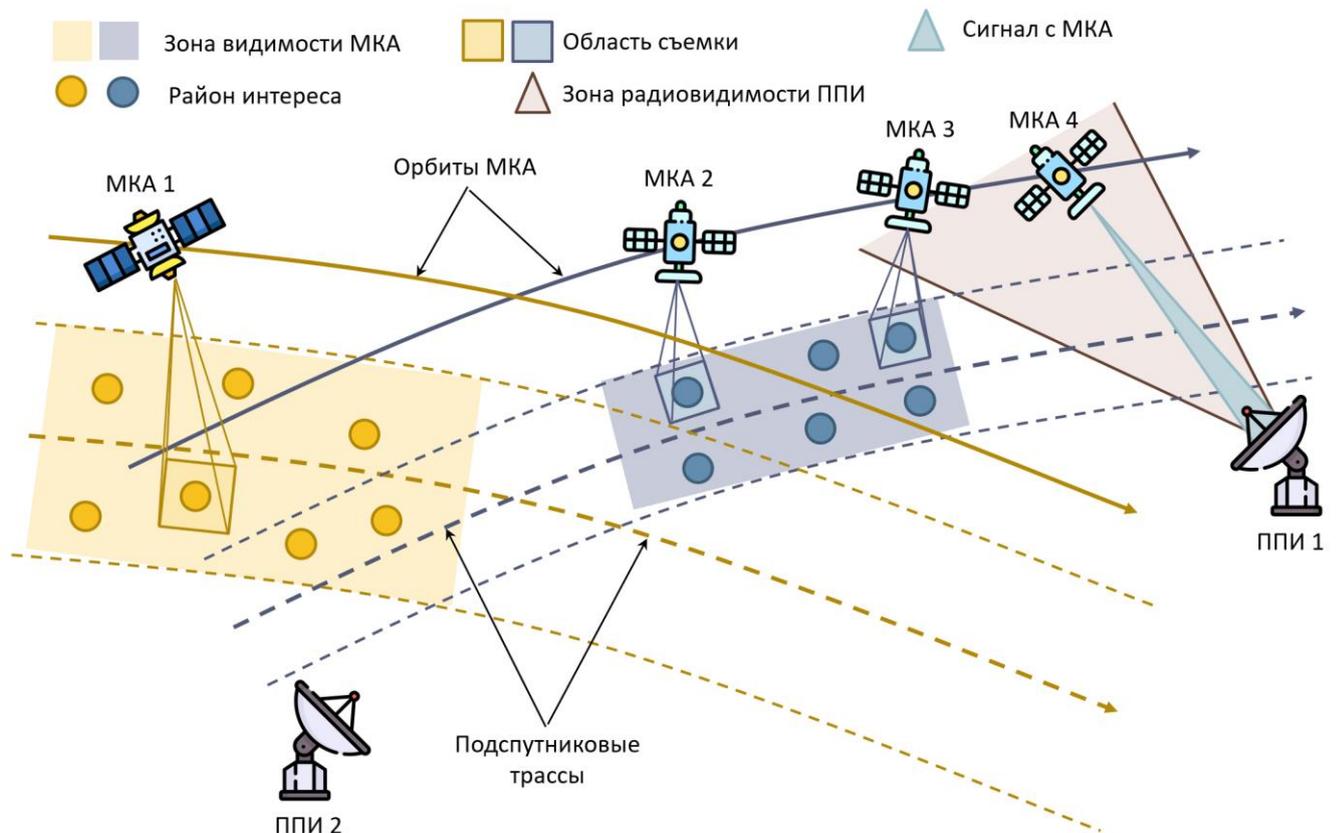


Рисунок 1.5 – Схема работы орбитальной группировки ДЗЗ

В процессе выполнения заявок потребителей на получение информации ДЗЗ в контуре планирования решаются следующие основные задачи:

- оценка реализуемости заявок потребителей (прогнозирование условий, качества и сроков выполнения заявок);
- формирование долгосрочного плана реализации заявок потребителей (при необходимости);
- согласование с потребителями результатов оценки реализуемости заявок;
- формирование каталогов РИ;
- разработка оперативных (на интервал до 1,5 суток) планов работы бортовой целевой аппаратуры, в том числе:
 - расчет информационной базы планирования;
 - предварительный отбор РИ, попадающих в полосу обзора КА и удовлетворяющих требованиям к условиям съемки;
 - формирование оптимального плана съемки;
 - контроль ограничений со стороны бортовых систем КА;
 - расчет исходных данных для работы целевой аппаратуры;
 - формирование планов сброса информации на наземные средства приема;
 - контроль за выполнением долгосрочного плана реализации заявок потребителей.

МКА, входящие в состав ОГ ДЗЗ, обладают двумя степенями свободы: по крену и по тангажу (Рисунок 1.6). Изменение угла поворота КА по крену позволяет расширить полосу видимости с левой или с правой стороны траектории движения КА. Изменение угла наклона КА по тангажу позволяет изменить время начала съемки [29]. Таким образом, появляется возможность съемки большего количества областей за один пролет (Рисунок 1.7).

Для реализации космической съемки ДЗЗ на основе заявок, поступающих от потребителей, формируется комплексный план. Заявка от потребителя включает следующие сведения: район наблюдения с указанием наименования территории и географических координат вершин района интереса, интервал дат съемки,

периодичность съемки, диапазон допустимых углов Солнца, приоритет территории, максимально допустимый угол крена.

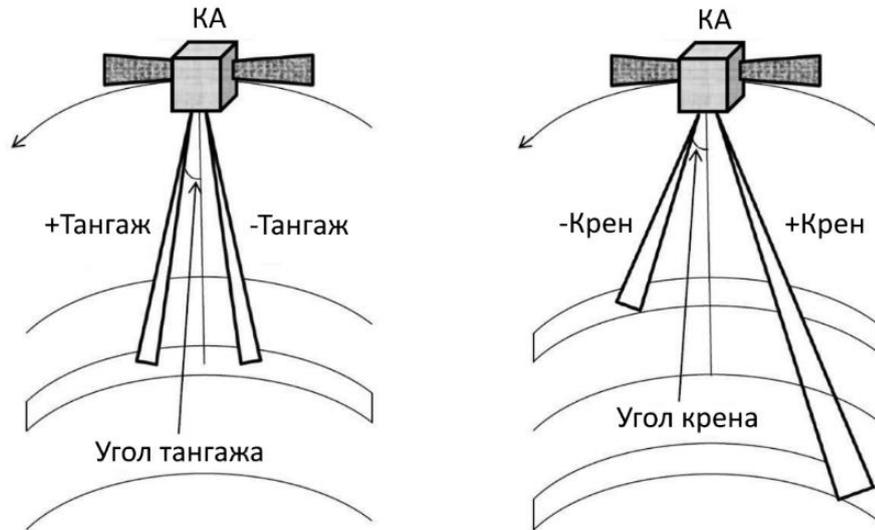


Рисунок 1.6 – Углы крена и тангажа космического аппарата

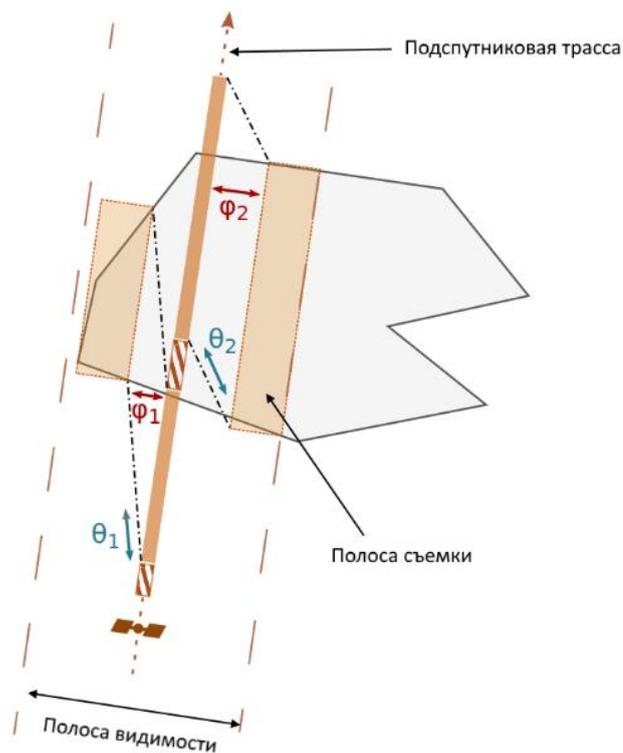


Рисунок 1.7 – Съемка КА с двумя степенями свободы

При наблюдении группировкой КА района, превышающего по своей площади зону захвата съемочной аппаратуры одного космического аппарата необходимо планировать нескольких операций съемки РИ для полного его покрытия (Рисунок 1.8). При этом появляется множество альтернативных

возможностей съемки района наблюдения с использованием ресурсов нескольких КА, а также ресурсов одного КА на разных витках [12].



Рисунок 1.8 – Площадной район интереса

На рисунке 1.9 представлена принципиальная схема формирования площадного снимка группировкой МКА. Снимок формируется с задержкой во времени на «орбитальное отставание» первого МКА от следующего и т.д. Одиночный кадр с высоты 450 км составляет 12x16 км. Размер формируемой 3 МКА площадки составит 65x240 км (время включения каждой съемочной аппаратуры не более 15 с).

При планировании съемки площадных РИ необходимо проводить выбор момента съемки в соответствии с несколькими критериями, такими как степень охвата, оперативность и пространственное разрешение полученных снимков. При этом один из критериев может противоречить другому, так, например, невозможно одновременно получить снимок с высоким пространственным разрешением и обширной зоной покрытия. Кроме того, необходимо учитывать взаимное перекрытие получаемых снимков, а также близость угла падения солнца для рядом расположенных областей.

Приведенные особенности сложно учесть в готовых методах.

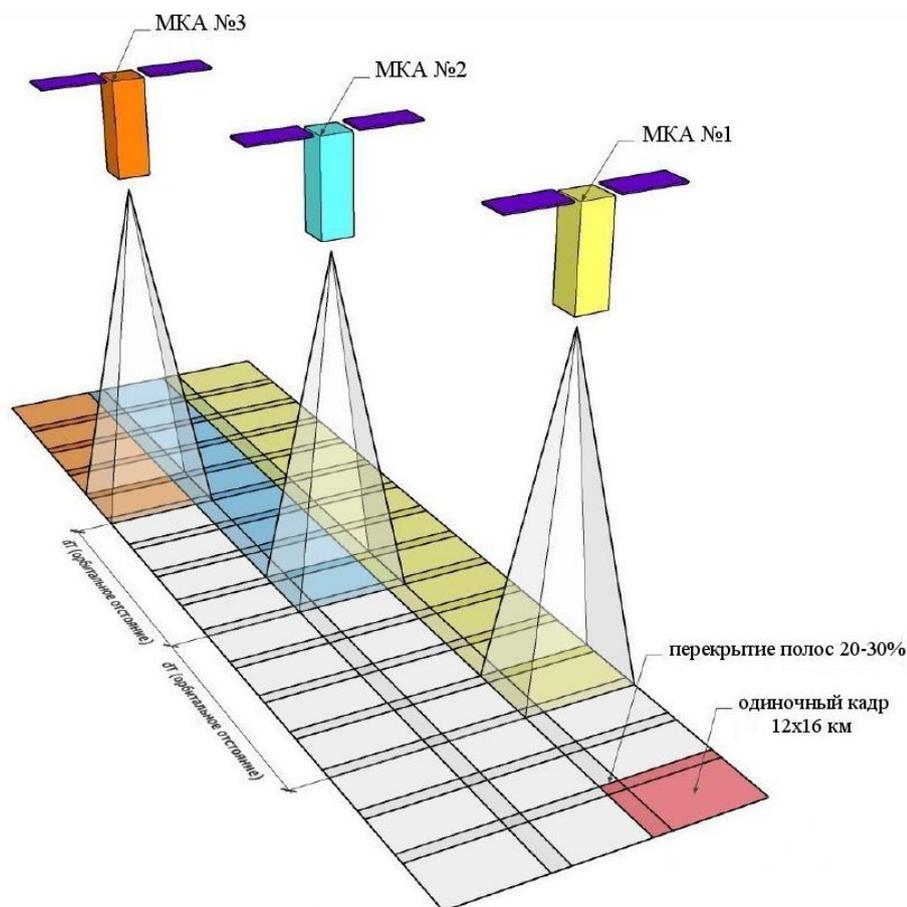


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема формирования площадного снимка группировкой МКА

1.3 Модель работы космической системы ДЗЗ

Приведенную структуру ОГ ДЗЗ можно представить в виде набора МКА $Sat = \{sat_i\}, i = \overline{1, L}$, где L – количество МКА, представляющего собой орбитальную группировку, и набора ППИ $GS = \{gs_j\}, j = \overline{1, G}$, где G – количество ППИ, представляющего собой распределенную сеть. Для возможности настройки модели МКА на аппараты разных производителей для каждого МКА sat_i определен следующий набор изменяемых параметров: орбита O_i , предельные углы крена⁵ $maxRollAngle_i$ и тангажа⁶ $maxPitchAngle_i$, позволяющие контролировать направление и время съемки, а также параметры установленной на него съемочной аппаратуры (фокусное расстояние f и размеры матрицы $matx$, определяющие

⁵ Крен – поворот аппарата вокруг его продольной оси

⁶ Тангаж – угловое движение аппарата относительно главной поперечной оси инерции

итоговое разрешение получаемого снимка, минимальный угол возвышения солнца $minSunAngle_i$, определяющий освещенность снимаемого РИ, объем запоминающего устройства V_i^{3Y} , определяющий максимальное количество снимков которые МКА может хранить в памяти до сброса на ППИ, а также время перенацеливания $retargetingT_i$ и лаг между съемками $lagT_i$, определяющие минимальные задержки между операциями).

В свою очередь, для каждого ППИ gs_j имеется возможность задать географическое местоположение $coord_j$, параметры установленной антенны (угол раствора $elevationAngle_j$, определяющий интервал радиовидимости МКА, и скорость приема данных $transmitSpeed_j$, определяющая длительность приема данных с МКА). Для ППИ и МКА могут быть указаны временные интервалы их недоступности $satConstr = \{satConstr_i^s\}$, $s = \overline{1, S}$, где S – количество ограничений для i -го МКА, $gsConstr = \{gsConstr_j^d\}$, $d = \overline{1, D}$, где D – количество ограничений для j -го ППИ. Каждый МКА может иметь ограничения на передачу информации на определенные ППИ (технического, организационного или какого-либо другого характера). Состав МКА и ППИ может меняться с течением времени (события ввода в эксплуатацию МКА/ППИ, выхода из строя МКА/ППИ и другие).

Миссия системы ДЗЗ состоит в выполнении набора заявок на съемку $R = \{r_k\}$, $k = \overline{1, K}$, где K – количество заявок в системе. Для заявки r_k может быть задан ее приоритет pr_k (заявка с низким приоритетом не должна мешать размещению более высокоприоритетной заявки) и множество ограничений: период, в который необходимо выполнить заявку $t_k = [t_k^{start}; t_k^{end}]$, допустимое линейное разрешение полученного снимка $minRes_k$ и $maxRes_k$ и допустимый угол солнца $minSunAngle_k$ и $maxSunAngle_k$. Состав набора заявок также может меняться в ходе работы системы (события поступления новых заявок, изменения параметров уже существующих и другие).

Для заявки на площадную съемку r_n осуществляется предварительное разбиение на множество смежных областей $R^n = \{r_v^n\}$, $v = \overline{1, V}$, где V – количество

полученных областей, соответствующих точечным РИ, полностью покрывающих заданный площадной РИ: $\sum_{v=1}^V S(r_v^n) \geq S(r_n)$, где S – функция расчета площади РИ.

В рассматриваемой модели МКА выполняет две операции:

- Съемка РИ r_k $imaging_k$, характеризующаяся интервалом выполнения $t_k^{imag} = [t_k^{imagStart}; t_k^{imagEnd}]$, углами крена $rollAngle_k$ и тангажа $pitchAngle_k$ МКА.
- Проведение сеанса связи МКА с ППИ с целью передачи полученных данных на Землю $drop_k$, характеризующаяся интервалом выполнения $t_k^{drop} = [t_k^{dropStart}; t_k^{dropEnd}]$ и скоростью передачи данных $baudRate_k$.

ППИ, в свою очередь, выполняет одну операцию – получение данных с МКА $receive_j$, характеризующуюся интервалом выполнения $t_k^{receive} = [t_k^{receiveStart}; t_k^{receiveEnd}]$.

Для определения возможности проведения операций съемки МКА или сеанса связи МКА с ППИ в тот или иной момент времени необходимо произвести оценочные расчеты интервалов видимостей: между МКА и РИ $targetVis = \{targetVis_i^k\}$, между МКА и ППИ $gsVis = \{gsVis_i^j\}$.

Расписание целевого применения ОГ ДЗЗ представляет собой объединение множества интервалов выполнения операций съемки РИ $T^{imag} = \{t_k^{imag}\}$, множества интервалов передачи данных МКА $T^{drop} = \{t_k^{drop}\}$ и множества интервалов приема данных ППИ $T^{receive} = \{t_k^{receive}\}$: $T^o = \{t_k^o\} = T^{imag} \cup T^{drop} \cup T^{receive}$.

Расчет полосы обзора. Под мгновенной зоной обзора КА понимается шаровой сегмент (АСВ), соответствующий углу крена γ и центральному углу ρ (рисунок 1.10), где γ – максимально возможный угол отклонения КА от вертикали, при котором возможно проведение зондирования поверхности Земли установленной на КА аппаратурой, ρ – угол между линией, соединяющей границу зоны с центром Земли O , и линией, направленной из центра Земли в подспутниковую точку C .

На рисунке 1.10 дополнительно показана высота полёта космического аппарата H , и радиус Земли R . Совокупность подспутниковых точек образует трассу полёта КА.

Так как $\rho = \alpha - \gamma$, $\sin \alpha = \frac{OK}{R}$, $\sin \gamma = \frac{OK}{R+H}$, $OK = \sin \gamma(R+H)$, $\sin \gamma(R+H) = R \sin \alpha$, то $\rho = \arcsin\left(\frac{R+H}{R} \sin \gamma\right) - \gamma$.

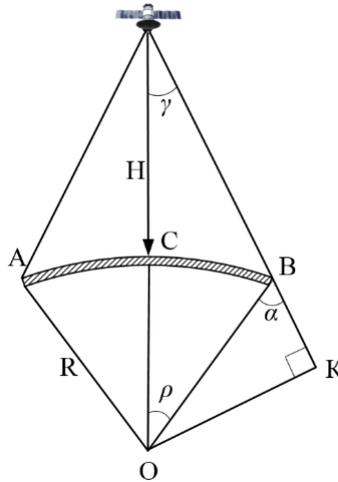


Рисунок 1.10 – Мгновенная зона обзора

Условие освещенности района интереса Солнцем. Переход от ISK к эклиптической системе координат (ЭСК) с направлением орта i_1^{\ominus} на Солнце определяется кватернионом:

$$L_{ISK_ЭСК} = \left(\cos \frac{\delta_c}{2} + i_1 \sin \frac{\delta_c}{2} \right) \circ \left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + i_3 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right),$$

где $\delta_c = \frac{2\pi(23+\frac{27}{60})}{360}$ – угол между эклиптической и экваторальной плоскостями, $\alpha_c = \frac{2\pi N}{365}$ – угол между направлением на точку весеннего равноденствия и линией Земля – Солнце, N – число дней, прошедших с 21 марта (точка весеннего равноденствия) до даты полёта.

В этом случае при известной дате полёта и известных географических координатах РИ можно определить кватернион ($\Delta L_{Об_ЭСК}$) углового положения построенной ЭСК и системы координат, связанной с РИ.

Так как $L_{ISK_ЭСК} = L_{ISK_Об} \circ \Delta L_{Об_ЭСК}$, то $\Delta L_{Об_ЭСК} = \tilde{L}_{ISK_Об} \circ L_{ISK_ЭСК}$

Отсюда условие освещённости РИ имеет вид:

$$2 \arccos(\lambda_0) |_{\Delta L_{Об_ЭСК}} \leq \frac{\pi}{2} - \alpha_c^{кр}.$$

Условие нахождения КА в зоне радиовидимости пункта приема информации. При оценке производительности КА ДЗЗ необходимо учитывать

временные характеристики нахождения космического аппарата в зоне радиовидимости ППИ. Эти характеристики зависят от параметров орбиты КА, географических координат ППИ, минимальных углов места линии визирования КА антенными устройствами ППИ. На рисунке 1.11 приведена геометрия зоны радиовидимости ППИ. Здесь дуга CDB – траектория полета космического аппарата, O – центр Земли, A – положение ППИ на поверхности Земли, δ_{min} – минимальный угол места линии визирования КА антенными устройствами ППИ, β_{max} – максимальный угол полураствора конуса зоны радиовидимости ППИ.

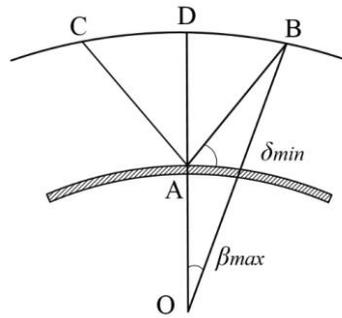


Рисунок 1.11 – Зона радиовидимости пункта приема информации

Положение ППИ относительно GSK определяется географическими координатами: широтой $\varphi_{ППИ}$ и долготой $\lambda_{ППИ}$. Кватернион положения системы координат, связанной с ППИ, относительно ISK равен:

$$A_{ISK_ППИ} = A_{ISK_GSK} \circ A_{\lambda_{ППИ}} \circ A_{\varphi_{ППИ}}.$$

Кватернион положения ППИ относительно положения КА ($A_{КА_ППИ}$) определяется так:

$$A_{ISK_ППИ} = A_{ISK_КА} \circ A_{КА_ППИ},$$

$$A_{КА_ППИ} = \tilde{A}_{ISK_КА} \circ A_{ISK_ППИ}.$$

Если $A_{КА_ППИ} = [\lambda_0^{ППИ}, \lambda_1^{ППИ}, \lambda_2^{ППИ}, \lambda_3^{ППИ}] A_{КА_Об} = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$, то условие взаимной видимости КА и ППИ имеет вид:

$$2 \arccos(\lambda_0^{ППИ}) |_{A_{КА_ППИ}} < \beta_{max}.$$

Оценка ширины зоны захвата снимаемого района интереса. На рисунке 1.12 приведена схема для оценки ширины зоны сканируемого РИ при одновременном повороте КА по углам крена и тангажа. Где H – высота полета КА, ϑ – угол тангажа КА, γ – угол крена КА.

требуется обеспечить согласованное планирование поступающих заявок, выявляя и разрешая конфликты с уже ранее запланированными заявками и перераспределяя их между МКА с целью повышения эффективности ОГ ДЗЗ путем получения снимков максимального качества (выполнять съемку с наилучшим разрешением) и минимизации сроков выполнения отдельных заказов (как можно раньше проводить передачу изображений на ППИ).

Целевая функция (ЦФ) заявки, составленная по методу весовых коэффициентов, представляет собой аддитивную свертку критериев планирования:

$$OF_k = \sum_{m=1}^M c_m^k F_m^k, \quad (1)$$

где OF_k – ЦФ k -й заявки, $E(OF_k) = [0;1]$, M – количество критериев планирования, c_m^k – весовой коэффициент m -ого критерия планирования для k -й заявки ($0 \leq c_m^k \leq 1$, $\sum_{m=1}^M c_m^k = 1$), F_m^k – оценка m -ого критерия планирования для k -й заявки, $E(F_m^k) = [0;1]$.

В качестве критериев оптимизации, на основе требований экспертов, выбраны минимизация сроков получения снимков F_1^k (2) и максимизация их качества F_2^k (3).

$$F_1^k = \frac{t_k^{end} - t_k^{dropEnd}}{t_k^{end} - t_k^{start}}, \quad (2)$$

$$F_2^k = 1 - \frac{maxRes_k - res_k}{maxRes_k - minRes_k}, \quad (3)$$

где res_k – реальное разрешение изображения для k -й заявки.

Весовые коэффициенты c_m^k задаются для каждой заявки индивидуально на основании экспертных оценок, которые определяют, следует ли получить снимки как можно раньше или с наиболее высоким качеством.

При построении расписания необходимо обеспечить адаптивную обработку следующих основных типов событий, приводящих к изменению постановки решаемой задачи: добавление/удаление заявки, изменение параметров ранее размещенной заявки, добавление/удаление МКА, добавление/удаление ППИ, изменение доступности МКА/ППИ.

На полученное решение накладывается ряд ограничений:

1. Выполнение условия нахождения РИ в зоне видимости МКА при съемке:

$$t_k^{image} \subseteq targetVis_i^k.$$

2. Выполнение условия освещенности РИ Солнцем:

$$minSunAngle_k \leq sunAngle_k \leq maxSunAngle_k,$$

где $sunAngle_k$ – угол падения солнца для k -й заявки.

3. Наличие радиовидимости МКА и ППИ при передаче результатов съемки:

$$t_k^{drop} \subseteq gsVis_i^j.$$

4. Наличие свободного места в запоминающем устройстве (ЗУ) МКА:

$$V_i^{3Y} \geq \sum_{mi=1}^{Mi} V_{mi}.$$

5. Соблюдения требований по разрешению, задаваемого в заявках:

$$minRes_k \leq res_k \leq maxRes_k.$$

6. Согласованность последовательности моментов времени операций:

$$t_k^{imagStart} < t_k^{imagEnd} < t_k^{dropStart} < t_k^{receivStart} < t_k^{dropEnd} < t_k^{receivEnd}.$$

7. Соблюдения требований по времени перенацеливания и минимальному лагу между съемками МКА:

$$t_k^{imagEnd} + retargetingT_i + lagT_i < t_p^{imagStart}.$$

8. Операции не должны нарушать ограничения доступности ресурсов, выполняющих их:

$$t_k^{imag} \cap satConstr_i^s = \emptyset, t_k^{drop} \cap satConstr_i^s = \emptyset, t_k^{receive} \cap gsConstr_j^d = \emptyset.$$

9. МКА и ППИ могут одновременно выполнять не более одной операции:

$$t_k^o \cap t_p^o = \emptyset, p = \overline{1, K}, k \neq p.$$

Необходимо разработать эвристический метод, находящий приближенное решение описанной задачи в режиме anytime, т.е. с учетом времени, доступного для расчетов, с первых шагов, чтобы работать «здесь и сейчас» в реальном времени.

1.5 Выводы

В рамках первой главы получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрены задачи планирования орбитальных группировок ДЗЗ и определены требования, которым должны удовлетворять методы и средства планирования для реализации целей перспективных миссий.
2. Проведен анализ современных задач управления ресурсами орбитальной группировки в реальном времени, который показывает, что в ходе планирования требуется обеспечить высокую адаптивность перестроения планов.
3. Проведен анализ структуры распределенных систем ДЗЗ и предложена теоретико-множественная модель работы данной системы, включающая модели, методы и алгоритмы, лежащие в основе взаимодействия элементов системы ДЗЗ.
4. Сформулирована новая постановка задачи согласованного планирования работы группировки МКА ДЗЗ для точечных и площадных РИ.

2 ОБЗОР МЕТОДОВ И СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ МИССИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Во данной главе выполняется обзор существующих методов планирования ресурсов ОГ ДЗЗ. Проводится анализ ограничений каждого метода для разработки сервиса согласованного планирования, и ставится задача разработки нового метода для цифровой платформы управления группировками МКА ДЗЗ.

Материал главы излагается в соответствии с публикацией соискателя [8].

Стремительный прогресс в области группировок МКА вызывает и рост числа публикаций по тематике планирования ресурсов таких группировок, чтобы от планирования отдельными аппаратами перейти к более эффективному планированию работы орбитальных группировок. Число работ в базе данных Scopus, посвященных решению данной проблемы, увеличилось за последнее десятилетие в 2,5 раза. В них затрагиваются различные постановки задачи планирования МКА, как для одиночных КА, так и орбитальных группировок, кроме того, некоторых работах предлагается решение отдельных подзадач планирования.

Методы, предложенные в рассмотренных работах основаны на традиционных и эвристических алгоритмах оптимизации. Кроме того, начинают появляться работы, предлагающие применение методов машинного обучения и мультиагентного подхода для решения поставленной проблемы.

2.1 Планирование работы одиночных космических аппаратов

Для решения задачи планирования одиночных космических аппаратов применяются методы графоаналитического и электронно-физического моделирования, методы экспертных оценок, методы линейного и динамического программирования, а также комбинаторного перебора.

В работе [5] предлагается применение метода графоаналитического моделирования, основная идея которого состоит в имитационном моделировании движения КА и съемки районов интереса. В работе [40] описывается метод

электронно-физического моделирования, являющийся развитием метода графоаналитического моделирования, который предполагает использование для моделирования средств ЭВМ. К достоинствам данных методов можно отнести их наглядность. Однако сложность реализации затрудняет их применение для решения современных задач оперативного планирования.

В работе [1] описывается реализация метода перебора в задаче оптимизации космической системы. Сущность метода перебора заключается в том, что необходимо рассматривать все возможные случаи, найти те, которые удовлетворяют условию данной задачи, и показать, что других решений нет. Использование его на практике ограничивается экспоненциальным ростом требуемых вычислений с ростом размерности исходных данных.

Применение метода динамического программирования рассматривается в работе [63]. В основе метода динамического программирования лежит принцип последовательной оптимизации критерия эффективности: решение исходной задачи оптимизации большой размерности заменяется решением последовательности подзадач меньшей размерности. Авторы работы отмечают, что данный метод эффективен на небольших объемах исходных данных, с ростом размерности задачи время вычислений увеличивается экспоненциально.

Применение методов экспертных оценок, получивших широкое применение в системном анализе, описывается в работе [27]. Он предполагает построение долгосрочных и среднесрочных космических программ на основе обработки мнений экспертной группы. К составлению оперативного плана данный метод в общем случае не применим.

В работе [21] производится обобщение существующих методик планирования. По мнению автора, планирование орбитальной группировки состоит из четырех стадий: на первой стадии моделируется динамика системы. Вторая стадия заключается в формировании модели планирования. Далее непосредственно решается задача формирования плана целевого функционирования системы. На четвертой стадии выполняется обработка полученных результатов.

Анализ методик, применявшихся для планирования работы одиночных КА, показал, что в основном они опираются на традиционные математические методы оптимизации и классические методы принятия решений. Хотя применение данных методик для решения современных задач планирования работы ОГ МКА ДЗЗ затруднено ввиду их плохой масштабируемости и экспоненциального роста вычислительных затрат при увеличении размерности задачи, они заложили теоретическую основу для создания современных парадигм планирования, позволяющих эффективно решать многокритериальных задач оптимизации большой размерности.

2.2 Основные подзадачи планирования

Кроме исследований посвященных разработке методик решения задачи планирования целевого функционирования КА ДЗЗ в общем виде, актуальными в настоящее время является исследования, направленные на решение частных проблем, таких как:

- планирование работы МКА с несколькими степенями свободы;
- планирование объектовой и площадной съемки;
- учет использования объемных ресурсов;
- учет возможной облачности;
- планирование сеансов связи с ППИ.

Проблема планирования работы КА с несколькими степенями свободы рассматривается в работах [44, 95, 89]. В работе [44] предложен алгоритм, производящий формирование плана целевого применения КА в соответствии с двумя критериями: оперативность и качество получаемых снимков. Результаты исследования разработанного метода, приведенные авторами статьи, демонстрируют его эффективность в части составления плана по данным критериям. К недостаткам рассматриваемой методики можно отнести отсутствие учета объемных ресурсов (объем памяти и заряд батареи).

В работе [95] предлагается применение адаптивного алгоритма поиска в большой окрестности (Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS). В

представленном алгоритме используются 6 операторов удаления и 3 оператора вставки для модификации текущего решения. В статье [89] представлено описание применения к решению данной задачи алгоритма многокритериального локального поиска на основе показателей. Результаты проведенных авторами экспериментов демонстрируют превосходство предлагаемой методики над применяемыми на практике решениями. Фактором, ограничивающим применения данных методик на реальных задачах большой размерности, является отсутствие направленного поиска, что приводит к сильному увеличению времени расчетов с ростом объема исходных данных.

Проблема планирования с учетом возможной облачности рассматривается в работе [92]. Облачность при проведении ДЗЗ является существенной нестационарной оптической помехой. Для учета облачности при съемке погодные условия моделируются как случайные события в условиях ограничений. Полученная модель решается при помощи разработанного алгоритма ветвления и разреза, основанного на генерации «ленивых» ограничений.

Вопросу оптимизации выполнения сеансов связи между спутником ДЗЗ и ППИ посвящены работы [65, 96, 69]. В качестве ключевой особенности задачи можно выделить разряженное пространство решений, которое сильно затрудняет ее решение при помощи традиционных алгоритмов оптимизации. Применяемый в настоящее время процесс планирования сеансов связи использует в качестве основного инструмента жадный алгоритм оптимизации и при необходимости ручную корректировку результатов планирования, что в свою очередь не отвечает современным требованиям.

Применение алгоритмов имитации отжига и поиска с запретами для данной задачи рассматривается в работе [65]. Исследования, проведенные авторами статьи, показали, что решение, полученное при помощи данных методов более близко к оптимальному, чем результаты, которые показывают жадные алгоритмы оптимизации, применяемые на практике. В работе [96] поставленная задача решается при помощи муравьиного алгоритма. При этом рассматривается граф конфликтов двух типов: конфликт между несколькими ППИ за один КА и

конфликт между несколькими КА за один ППИ. Результаты исследований демонстрируют превосходство представленного решения над традиционным муравьиным алгоритмом. В качестве недостатков предлагаемого подхода авторы статьи указывают достаточно невысокую производительность данного алгоритма в случае задач большой размерности.

Авторы статьи [69] производят планирование сеансов связи КА-ППИ путем анализа конфликтов за их совместное использование. В предложенной методике выделяют совместимые и непримиримые конфликты. Кроме того, вводится запрет на неэффективный обмен между запросами. Авторы отмечают, что по сравнению с классическими алгоритмами оптимизации предложенный метод позволяет получить решение более близкое к оптимальному.

Оптимизация съемки площадных РИ рассматривается в работах [72, 59]. Для решения данной задачи предлагается применение многокритериального генетического алгоритма. Результаты сравнения разработанного алгоритма демонстрируют его превосходство над генетическим и жадным алгоритмом оптимизации, в случае если необходима оптимизация сразу по нескольким параметрам.

Авторы статьи [61] предлагают решение задачи планирования спутниковой съемки точечных и площадных РИ в режиме реально времени. Авторы предлагают разделить процесс планирования на 3 стадии:

- стадия предварительного распределения;
- стадия глубокого планирования;
- стадия точного планирования.

Результаты сравнительных исследований, приведенные в работе, показали сокращение времени расчета.

Анализ работ показал актуальность в настоящее время исследований, направленность на решение отдельных подзадач планирования. В качестве основных из них можно выделить планирования работы поворотливого КА, планирования съемки с учетом возможной облачности, оптимизация выполнения сеансов связи между спутником ДЗЗ и ППИ, оптимизация наблюдения

площадного района. Для их решения предлагаются методики, опирающиеся на различного рода эвристики, для сокращения перебора.

2.3 Планирование работы орбитальных группировок

Существующие подходы к планированию работы многоспутниковых ОГ ДЗЗ можно подразделить на централизованные, в которых построения плана производится на Земле с последующей его передачей при помощи наземных станций управления космическим аппаратам на исполнение, и распределенные, в которых базовые функции процесса управления реализуются непосредственно бортовыми средствами КА [23].

В работе [19] задачу планирования целевого функционирования ОГ МКА ДЗЗ рассматривают как задачу формирования временных последовательностей выполнения операций, составляющих план целевого функционирования ОГ МКА ДЗЗ на заданном интервале времени. Данный алгоритм ориентирован поиск оптимального плана как кратчайшего маршрута на графе, модифицирует классические сетевые и волновые алгоритмы.

Другой подход к решению данной задачи приводится в работе [64]. В качестве отличительной особенности рассматриваемой постановки задачи авторы выделяют наличие непрерывно и асинхронно поступающих заявок на съемку РИ от различных потребителей. При этом суммарная нагрузка на ОГ МКА ДЗЗ заведомо превышает ее возможности.

Для поиска решения авторы предлагают использовать муравьиный алгоритм, основанный на модели поведения муравьев, ищущих кратчайший путь от колонии к источнику пищи. Для реализации этого алгоритма все множество расписаний работы одного космического аппарата представляется в виде ориентированного графа. В узлах графа располагаются сеансы съемки и сброса данных, ребра же отражают два возможных состояния сеанса: запланирован он или нет.

В процессе поиска решения агенты муравьев перемещаются по графу от начальной вершины к конечной, выбирая в каждой промежуточной вершине одно из двух исходящих ребер. После каждого хода выполняется проверка полученного

промежуточного решения на предмет выполнения всех накладываемых ограничений. Если полученное решение перестает отвечать ограничениям, производится его исправление. После того как агент муравья доходит до конечной вершины, пересчитываются метки ребер графа.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода авторы работы провели ряд экспериментальных исследований, которые демонстрируют превосходство данной методики над генетическим алгоритмом при решении задачи планирования в динамически изменяющихся условиях.

В статье [66] для планирования работы ОГ МКА ДЗЗ предложен метод, основанный на генетическом алгоритме. В качестве критерия оптимизации выбрана минимизация времени отклика орбитальной группировки (время от получения заявки пользователя до доставки пользователю результатов съемки). Особенностью МКА, входящих в состав данной ОГ, является наличие радиолокатора с синтезируемой апертурой. Результаты исследований, приведенных в работе, демонстрируют сокращение времени отклика рассматриваемой группировки МКА.

В статье [93] описывается решение проблемы планирования работы ОГ МКА ДЗЗ в режиме реального времени. Авторами статьи предлагается алгоритм слияния вновь поступающих в систему заявок с уже запланированными. Данное слияние возможно в случае, если МКА одновременно наблюдает несколько расположенных близко заявок на съёмку РИ, и при этом не нарушаются накладываемые на них ограничения. Результаты проведенных авторами статьи экспериментальных исследований показали эффективность предложенного метода в сравнении с версией алгоритма без объединения заявок и его применимость для расчетов в реальном времени.

Различные варианты применения методов машинного обучения (МО) описываются в работах [76, 88, 48]. Данные методы дают возможность не кодировать жестко части алгоритма, а производить его обучение на исторических данных. Следует отметить, что при этом затруднен ввод дополнительных ограничений и необходимо большой объем обучающей выборки.

Еще одним перспективным подходом относительно планирования работы группировкой спутников ДЗЗ является мультиагентный подход, рассматриваемый в работах [43, 77]. Представление отдельных частей рассматриваемой системы в виде автономных взаимодействующих друг с другом агентов позволяет эффективно решать задачи большой размерности. В рассматриваемой работе выделяют два основных типа агентов: агент МКА и агент полосы съемки. Сравнительное исследование предложенного метода с применяемым на практике жадным алгоритмом демонстрирует превосходство представленного в работе подхода. В работе [77] процесс назначения заявок на МКА представлен в виде аукциона. Каждый МКА предлагает цену за свободные слоты в своем расписании в соответствии с текущей загрузкой.

Хотя централизованный подход к планированию и позволяет в общем случае получить за приемлемое время локально-оптимальный план выполнения операций КСН, в силу объективных обстоятельств он обладает известными объективными недостатками, такими как:

- 1) необходимость планирования использования ресурсов с запасом;
- 2) замедленная реакция на возникающие в ходе выполнения миссии события;
- 3) невозможность проведения дополнительных съемок по результатам обработки и анализа уже проведенных наблюдений.

Для преодоления описанных недостатков в настоящее время ведутся активные исследования в области организации автономного планирования.

В работе [68] описывается комбинированная система планирования VAMOS. Предполагается, что данная система будет применяться для планирования работы КА группировки Viros. Отличительной особенностью данных КА является возможность анализа полученных снимков непосредственно на борту КА на предмет оценки процента облачности.

В качестве начального решения предполагается использование плана, построенного на Земле. При этом наземное планирование проводится с определенным запасом по использованию ресурсов. Это позволяет включать в

расписание дополнительные задачи непосредственно в ходе выполнения миссии. После выполнения очередной задачи по съемке РИ, ее результаты анализируются. Снимки с высоким процентом облачности отбраковываются и сразу удаляются из хранилища. При этом запускается автономное планирование с целью вставки в расписание повторного выполнения данной задачи.

В работах [87, 90, 45] рассматриваются подходы к организации полностью автономного планирования. Однако представленные решения ограничиваются только случаем одного аппарата, таким образом в них не затрагивается решение проблемы организации распределенных вычислений и реализации обмена сообщениями внутри орбитальной группировки.

2.4 Программные системы управления ресурсами орбитальных группировок

В настоящее время рядом компаний разработаны различные информационные системы построения расписания целевого применения космических систем при проведении ДЗЗ, используемых на практике для управления различными миссиями.

Рассмотрим наиболее популярные из них.

Система CPAW (Collection Planning & Analysis Workstation) разработана в компании Orbit Logic (США) [73]. Данная система предназначена для составления плана работы ОГ МКА ДЗЗ с учетом различного оборудования, установленного на аппараты.

В данной системе реализованы следующие основные функции:

- ввод заявок в систему;
- планирование сеансов связи;
- определение горизонта планирования;
- фильтрация заявок и целей;
- планирование операций съемок РИ
- планирование сеансов связи МКА с ППИ;
- контроль выполнения съемок.

Планирование работы нескольких КА выполняется с учетом координации планов различных КА, целью которой является исключение дублирования съемок одних и тех же РИ, согласование съемок отдельных частей площадных РИ разными КА. Планирование в системе может выполняться как с участием операторов, так и в полностью автоматическом режиме.

Система flexplan. Система планирования миссий космических аппаратов flexplan разработана компанией GMV [49].

Для составления расписания в ней используются четыре основных элемента:

- Ресурсы: Модель ресурсов, участвующих в миссии, включая космические ресурсы (космические аппараты, датчики, антенны), наземные ресурсы (ППИ, антенны) и людские ресурсы (рабочая сила, смены операторов).

- События: События, воздействующие на модель, могут быть как внешними (выход из строя КА, изменение орбиты КА и т.д.), так и внутренними (события, возникающие в процессе составления расписания).

- Задачи, выполнение которых необходимо запланировать.

- Правила: логические программные алгоритмы, применяемые в процессе составления расписаний, оптимизации плана и разрешения ограничений. Составление правил производится специалистом ЦУПа динамически, без необходимости перекомпиляции программного обеспечения.

Отличительной особенностью данной системы является возможность гибкой настройки моделей ресурсов, событий, задач и правил, которая позволяет полностью контролировать процесс составления плана и дает возможность адаптировать систему для планирования новых типов миссий без необходимости внесения изменений в исходный код. Система flexplan также позволяет добавлять в процесс составления расписания дополнительные модули для специализированных расчетов или операций, например, в процесс добавления ограничений может быть интегрирован модуль расчета радиочастотных помех.

Пакет прикладных программ GSOC. Пакет прикладных программ GSOC разработан Немецким центром космических операций [86]. Он применялся при составлении планов проведения многих космических миссий, таких как SRTM

(создание цифровой модели высот Земли с помощью радарной топографической съёмки её поверхности), Bird (инфракрасное наблюдение Земли), Champ (наблюдение гравитационных и магнитных полей Земли), Grace (изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций), TerraSAR-X / TanDEM-X (радиолокационное наблюдение Земли в X-диапазоне с высоким разрешением).

Основными компонентами данного пакета являются библиотека планирования PLATO и интерактивный инструмент планирования и визуализации PINTA. К достоинствам библиотеки PLATO можно отнести наличие широких описательных возможностей моделирования и высокопроизводительный многопоточный движок с поддержкой создания пользовательских алгоритмов. В ней также доступны универсальные алгоритмы планирования, которые можно комбинировать между собой и расширять.

Графический компонент PINTA оптимально подходит для выполнения процесса планирования, начиная с моделирования, включая определение ресурсов, задач и ограничений, и заканчивая автоматическим планированием. Кроме того, с помощью индикаторов конфликтов и визуализации использования ресурсов возможна интуитивно понятная ручная корректировка расписания. Кроме многочисленных общих функций импорта и экспорта информации и механизма плагинов для настройки пользовательского интерфейса под конкретные задачи, PINTA предоставляет графический интерфейс для работы с базой данных системы планирования и библиотекой PLATO.

SaVoir (Swath Acquisition Viewer) разработан в компании Taitus Software [78] для Европейского космического агентства для поддержки операций Международной хартии по космосу и крупным катастрофам. Задача состояла в том, чтобы предоставить простой в использовании инструмент для быстрого определения потенциальных возможностей сбора данных в любой интересующей области и с любой комбинацией спутников и датчиков, что ускорит работу по упорядочению данных для оказания помощи при стихийных бедствиях. SaVoir поставляется в полной конфигурации с большинством летающих в настоящее время оптических и радиолокационных спутников (более 75) и их полезными

нагрузками, включая Radarsats, RapidEyes, DMC, TerraSAR-X, SPOT, Kompsat, Formosat, NOAA, Landsat, Aqua, Terra и другие. Настроить новые миссии очень просто с помощью утилит или путем редактирования XML-файлов. SaVoir регулярно используется в операциях Cosmo-Skymed и Deimos-1. В число клиентов SaVoir входят ESA (ESTEC, ESRIN и ESAC), NOAA (NESDIS), Japan Space Imaging, GeoServe, Indra Espacio и другие.

Рассмотренные программные системы работают в пакетном режиме, требуют больших затрат времени на расчет планов функционирования космической системы и не могут применяться для адаптивной корректировки планов в реальном времени по мере поступления новых событий, что является необходимым условием при создании перспективных КС ДЗЗ.

2.5 Выводы

В рамках исследования во второй главе получены следующие основные результаты:

1. Проведен обзор современных методов планирования ресурсов космических систем ДЗЗ. Показано, что в виду принадлежности задачи к классу NP-трудных, широкое распространение получили различные приближенные методы, среди которых наиболее распространенными являются генетические алгоритмы и эвристические правила диспетчеризации.

2. В результате проведенного анализа выделены следующие основные подзадачи, которые необходимо решить для рассматриваемого управления спутниковой группировкой:

1. Планирование работы группировки МКА.
2. Планирование работы МКА с несколькими степенями свободы.
3. Планирование объектовой съемки.
4. Планирование площадной съемки.
5. Учет приоритетов запросов.
6. Учет использования объемных ресурсов.
7. Учет возможной облачности.

8. Планирование сеансов связи с ППИ.

9. Динамическое перестроение расписания по событиям.

В таблице 2.1 маркерами показано, какие задачи решаются в соответствующих работах.

Таблица 2.1 – Перечень решаемых в различных работах задач планирования МКА

Работа \ № задачи	№ задачи								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D. Karapetyan, 2015					+			+	
F. Bunkheila, 2016		+	+	+					
Z. Zhang, 2018	+							+	
L. Xiaolu, 2017		+	+		+	+		+	
X. Niu, 2018	+			+					
K. Luo, 2017	+				+			+	
J. Wang, 2016	+		+			+	+		
L. He, 2018	+	+	+		+			+	
P. Tangpattanakul, 2015		+	+		+				
H. Kim, 2015	+	+	+					+	
J. Bonnet, 2015	+		+			+	+	+	+
J. Wang, 2015	+	+	+					+	+
L. He, 2019	+	+	+	+		+	+		+
В. Городецкий, 2017	+		+						+
А. Жиляев, 2016	+		+			+		+	+
Ю. Горелов, 2018	+	+	+	+					
<i>Предлагаемый метод</i>	+	+	+	+	+	+		+	+

Анализ приведенных работ показал, что далеко не все требуемые задачи решаются, расчеты имеют пакетный характер, трудно вводить новые критерии. При этом появились первые работы по применению мультиагентных технологий для решения поставленной задачи.

3. По степени охвата решаемых задач наиболее близка работа [61], в ней решаются практически все выделенные в результате анализа задачи, за исключением планирования сеансов связи с ППИ и учета приоритетов. По применяемым методам более близка работа [43]. В ней также применяется мультиагентный метод для планирования путем взаимодействия агентов полосы съемки и агентов КА. Однако в данной работе используется стандартная библиотека агентов с ограниченными протоколами взаимодействия, не решены важные задачи планирования площадной съемки и планирования МКА с несколькими степенями свободы.

4. Обосновано применение мультиагентных технологий для решения поставленной задачи согласованного планирования работы ОГ МКА ДЗЗ.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СОГЛАСОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАЯВОК НА СЪЕМКУ

В данной главе описывается разработанный метод для обработки заявок на объектовую и площадную съемку в группировках МКА ДЗЗ в пакетном режиме, но с сохранением возможности адаптивного согласованного перестроения плана по событиям. В ходе разработки предложенная ранее мультиагентная модель сети потребностей и возможностей для управления ОГ МКА ДЗЗ была модифицирована для обеспечения пакетного режима работы сервиса согласованного планирования и обработки большого числа заявок, причем с возможностью распараллеливания вычислений при наличии нескольких ядер процессора. При этом рассматриваются такие заявки на съемку РИ, которые могут быть удовлетворены только несколькими МКА на разных витках, т.е. обеспечивается как конкуренция, так и кооперация МКА.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [9, 10, 12, 50, 51].

3.1 Мультиагентной подход к решению задачи управления ресурсами комической группировки

Для решения задачи планирования предлагается использовать мультиагентный подход, при котором решение сложных задач выполняется в распределенной среде взаимодействующих между собой программных агентов, действующих параллельно и асинхронно на принципах самоорганизации [91]. Агентами называются программные объекты, которые выполняют определенные упреждающие и корректирующие действия в соответствии с заданиями, делегированными человеком. Агенты воспринимают свое окружение с помощью датчиков и манипулируют им при помощи исполнительных механизмов (Рисунок 3.1) [36].

Множество взаимодействующих агентов, помещенных в общую физическую или виртуальную среду, от которой они получают данные о происходящих событиях, интерпретируют их и воздействуют на среду, образует мультиагентную

систему (МАС) [30]. Важным аспектом мультиагентной системы является то, что отдельные агенты могут присоединиться к системе или покинуть ее в любое время. Кроме того, агенты не обязательно должны сотрудничать, они могут также конкурировать друг с другом [10].

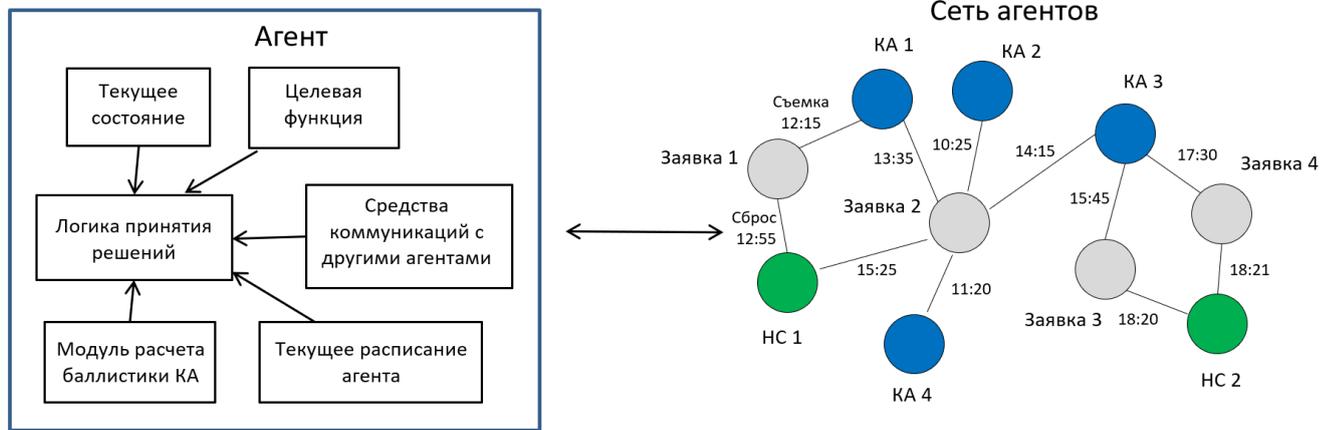


Рисунок 3.1 – Схема программного агента

Предлагаемые в данной работе мультиагентные модели, методы и алгоритмы планирования работы КС ДЗЗ основываются на методе сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) [51]. В качестве агентов потребностей выступают агенты заявок, а в качестве агентов возможностей – КА и ППИ.

В разработанной мультиагентной модели ПВ-сети расписание МКА и ППИ самоорганизуется на виртуальном рынке системы в ходе переговоров с уступками программных определенных классов агентов заказов и ресурсов, направленных на выявление и разрешение конфликтов с взаимными компенсациями. Расписание по приходу каждого события лишь частично быстро перестраивается в ходе командной работы агенты, направленной на достижение состояния неуплощаемого «конкурентного равновесия», в котором ни один из агентов не может более улучшить результат. Разработанные модели, методы и алгоритмы делают сервис гибким и адаптивным, пригодным для работы в реальном времени для повышения эффективности ресурсов.

На рисунке 3.2 показано, что приход «Нового заказа» вызвал переговоры по разрешению конфликтов между агентами ранее запланированных заказов, которые завершились принятием коллективного согласованного решения о выполнении

трех шагов перестановки в расписании, чтобы разместить новый заказ с выгодой для системы в целом.

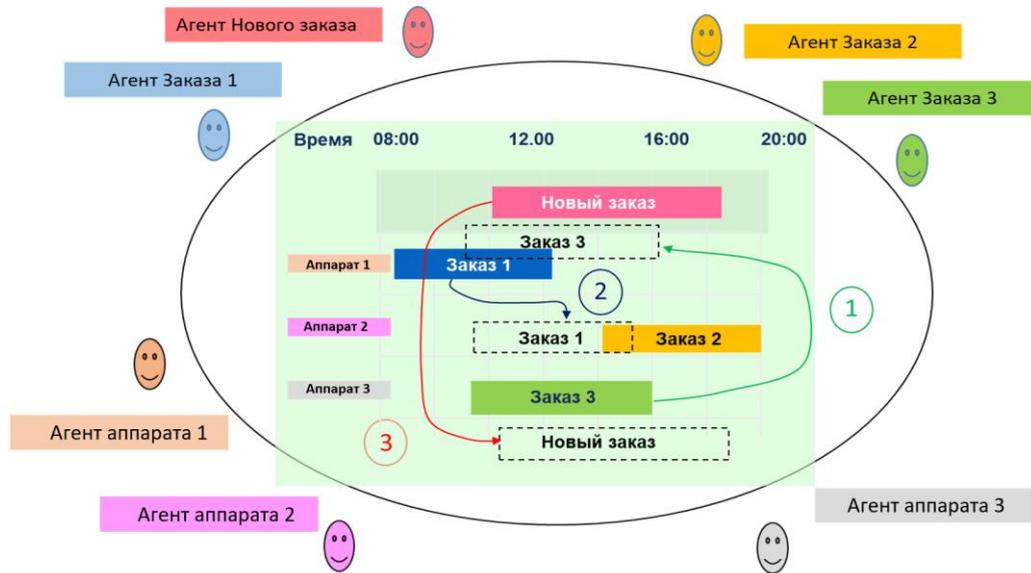


Рисунок 3.2 – Результат переговоров агентов заказов и ресурсов для поиска вариантов размещения нового заказа

Новизна предлагаемого метода по сравнению с разработанным методом ПВ-сети [6, 7] состоит в том, что в качестве ориентира для поиска идеального решения каждому агенту заявки дается возможность независимо оценить предельный глобальный лучший вариант своего размещения, к которому далее агент будет стремиться.

3.2 Модель данных системы ДЗЗ

В ходе разработки был проведен системный анализ и построена модель данных системы ДЗЗ. В таблице 3.1 представлено описание основных сущностей данной модели.

Таблица 3.1 – Описание сущностей модели данных

Название	Назначение
Спутник (<i>Satellite</i>)	Описывает КА. Содержит информацию о его наименовании, орбите, максимальных углах крена и тангажа и объеме памяти.

Таблица 3.1 (продолжение) – Описание сущностей модели данных

Название	Назначение
Съемочная аппаратура (<i>Camera</i>)	Описывает съемочную аппаратуру КА. Содержит информацию о длине фокусного расстояния оптического телескопа, длине ПЗС-матрицы, размере элемента ПЗС-матрицы, максимальной продолжительности одной съемки, минимальном интервале между съемками и условиях освещенности.
Бортовая аппаратура ВРЛ (<i>Transmitter</i>)	Содержит информацию о скорости передачи данных, времени перенацеливания и объеме памяти ЗУ.
Пункт приема информации (<i>GroundStation</i>)	Описывает ППИ. Содержит информацию о ее наименовании, географическом местоположении, скорости передачи данных и минимальном угле возвышения КА над горизонтом.
Календарь доступности ресурса (<i>Calendar</i>)	Описывает календарь доступности ресурса. Содержит информацию о времени начала и окончания его действия и интервалах времени доступности ресурса
Задача на съемку точечного РИ (<i>PointTask</i>)	Описывает задачу на съемку точечного РИ. Содержит информацию о времени начала и окончания, географических координатах РИ.
Задача на съемку площадного РИ (<i>AreaTask</i>)	Описывает задачу на съемку площадного РИ. Содержит информацию о времени начала и окончания, объекте наблюдения.

Структура модели данных в виде диаграммы классов в нотации UML представлена на рисунке 3.3.

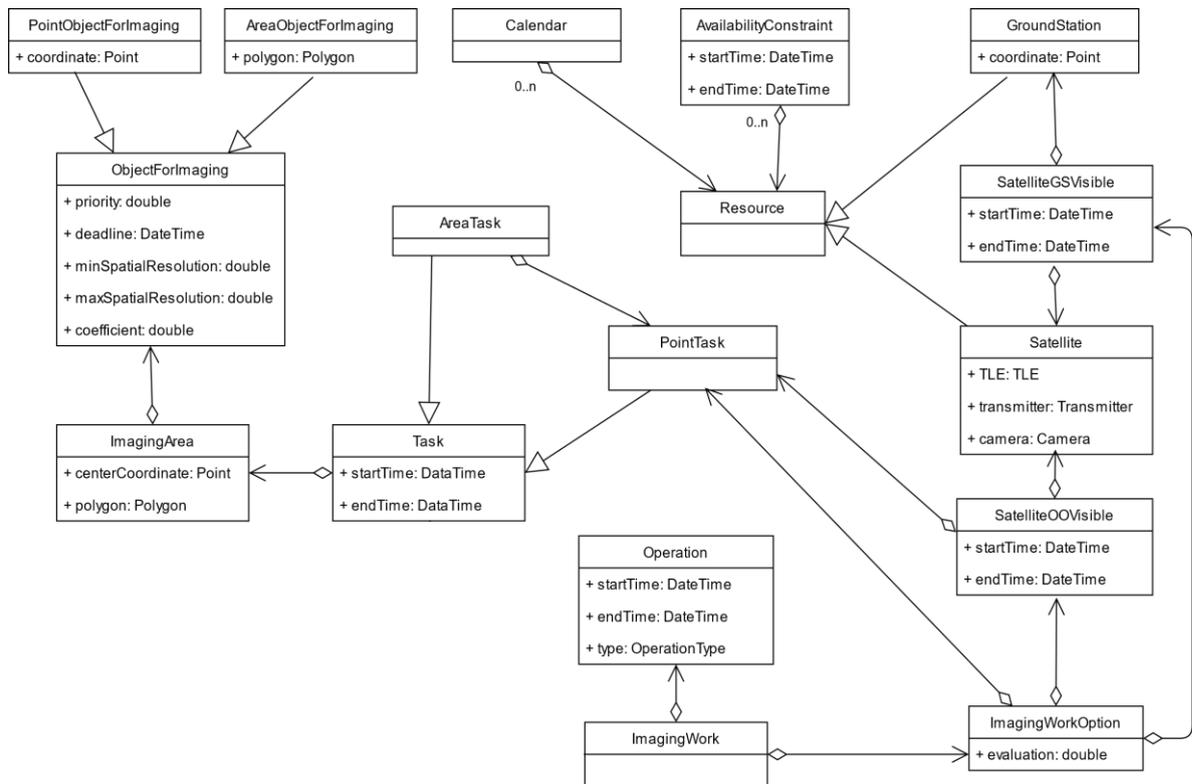


Рисунок 3.3 – Модель данных

3.3 Метод согласованного планирования

В ходе разработки предложенная ранее мультиагентная модель ПВ-сети для управления ОГ МКА ДЗЗ была модифицирована для обеспечения пакетного режима работы сервиса согласованного планирования и обработки большого числа заявок, причем с возможностью распараллеливания вычислений при наличии нескольких ядер процессора (до 8 в экспериментах). При этом рассматриваются такие заявки на съемку РИ, которые могут быть удовлетворены только несколькими МКА на разных витках, т.е. обеспечивается как конкуренция, так и кооперация МКА.

Базовые агенты ПВ-сети доработаны для предметной области целым рядом алгоритмов расчетов: баллистика, особенности съемки и сброса информации и другие. В таблице 3.2 представлены основные классы агентов разработанного метода.

Таблица 3.2 – Основные классы агентов

Тип	Цель	Ограничения
Агент заявки на съемку точечного РИ	Быть выполненным как можно раньше F_1^k (2) и с максимальным качеством снимка F_2^k (3).	Сроки, разрешение снимков, освещенность
Агент заявки на съемку площадного РИ	Быть выполненным в полном объеме: $\forall r_v^n \in R^n \exists t_v^o,$ где V – количество областей, соответствующих точечным РИ	Сроки, разрешение снимков, освещенность, взаимное перекрытие
Агент ресурса: – космический аппарат; – пункт приема информации.	Распределение слотов свободного времени между заявками с учетом ограничений	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания, производительность
Агент системы	Выявление «узких мест» в расписании, управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время планирования, глубина переговоров

Возможность обработки на порядки большего числа заявок достигается за счет унификации части расчетов (например, видимостей между МКА и ППИ $gsVis$) и вынесения их на предварительные стадии работы сервиса, чтобы выполнять один раз до стадии мультиагентного планирования, а также использования принципа «ленивых вычислений»: выполнять расчеты только в момент времени, когда требуется результат, а не на всем горизонте планирования (например, видимостей между МКА и РИ $targetVis$). Результаты этих расчетов сохраняются и не требуют повторных вычислений при следующем запросе, что позволяет снизить сложность метода. Кроме того, в реализованном методе введена параллельная схема работы активных агентов заявок на съемку, ограничиваемая лишь числом доступных потоков процессора, которые действуют асинхронно и параллельно, конкурируя за

ресурсы МКА. В этих целях разработан механизм конкурентного обращения и внесения изменений в разделяемые ресурсы, позволяющий полностью использовать естественный параллелизм мультиагентного метода решения задачи. В частности, каждый агент заявки $oAgent_k$ вначале независимо находит предельно лучший вариант своего размещения o_k , как если бы не было конкуренции с другими агентами, принимаемый за идеальное значение целевой функции агента $OF_k(o_k)$ (2), к которому агент в дальнейшем будет стремиться, что позволяет сделать поиск вариантов более узко направленным.

Разработанный метод согласованного планирования разделен на две стадии, которые должен проходить каждый агент заявки. Первая стадия – предварительное планирование, целью которой является получение начального допустимого расписания. Вторая стадия направлена на выявление и разрешение конфликтов (под конфликтом понимается ситуация, когда несколько заявок конкурирует за использование одних и тех же слотов свободного времени ресурса: $t_k^o \cap t_p^o = \emptyset, p = \overline{1, K}, k \neq p$), когда полученное расписание улучшается с использованием мультиагентного подхода до достижения «конкурентного равновесия», представляющего согласованное расписание. Данные стадии выполняются последовательно, т.е. вначале все заявки проходят бесконфликтную стадию, и после того, как все агенты заявок произвели попытку начального размещения в расписании, которая может быть неудачной, т.е. заявка останется незапланированной, запускается стадия разбора конфликтов, в отличие от работ предшественников, где активный агент $oAgent_k$ проходил обе стадии сразу. Таким образом, на стадии разбора конфликтов агент $oAgent_k$ использует данные по текущей загрузке ресурсов (когда и каким аппаратом заявка будет выполнена) из построенного расписания T_p^o , за счет этого сокращается количество перестановок.

На рисунке 3.4 показана схема запуска агентов на активность на каждой из стадий планирования.

Рассмотрим более подробно стадии планирования пакета заявок на съемку R, поступающих в систему. На подготовительной стадии формируется очередь заявок на съемку, упорядоченная по убыванию значения их приоритета $prk \{r_k | k \neq m,$

$pr_k \geq pr_m$. Таким образом, более высокоприоритетные заявки планируются в первую очередь, что позволяет им занять наиболее выгодные места в расписании. Запуск агентов на активность выполняется параллельно на нескольких вычислительных потоках ЭВМ (количество одновременно активных агентов ограничивается числом ядер процессора). После того как очередная порция агентов $oAgent_k$ завершила свою активность, сразу запускается следующая.

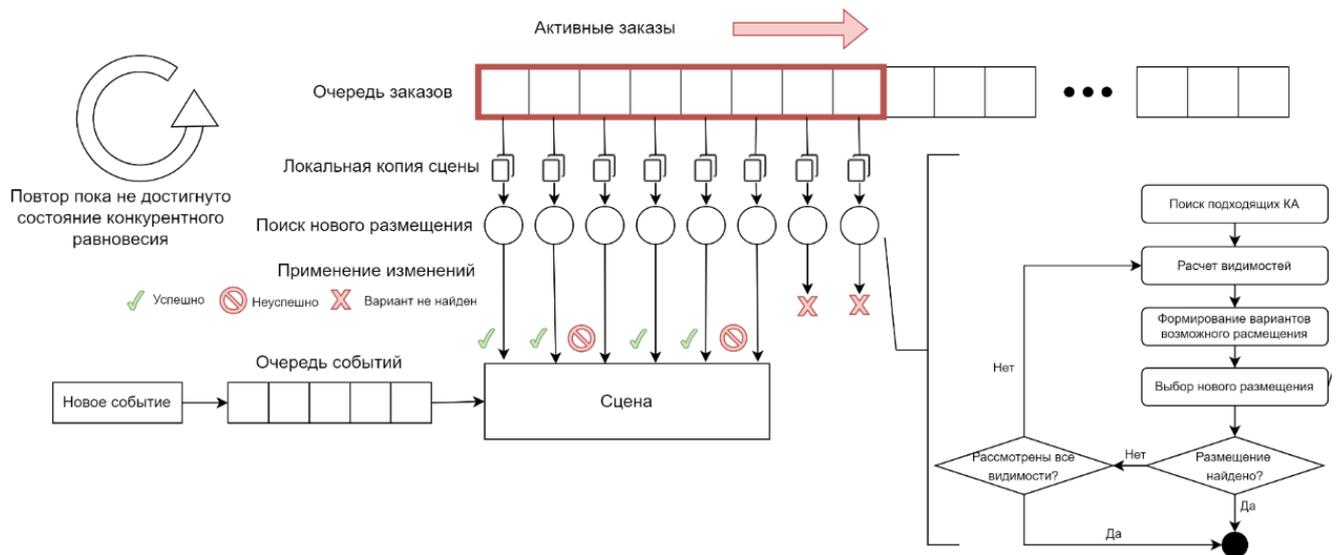


Рисунок 3.4 – Схема запуска агентов на активность

На первой стадии планирование выполняется по жадному алгоритму: агент размещается на первом доступном варианте. Для этого вначале выполняется формирование вариантов возможного размещения, представляющих собой совокупность интервалов для выполнения операций съемки $O_k^{imag} = \{o_{kl}^{imag}\}$, передачи данных МКА $O_k^{drop} = \{o_{kl}^{drop}\}$ и приема данных ППИ $O_k^{receive} = \{o_{kl}^{receive}\}$: $O_k = \{o_{kl}\} = O_k^{imag} \cup O_k^{drop} \cup O_k^{receive}$, $l = \overline{1, L}$, где L – количество вариантов размещения k -ой заявки. Данные расчеты реализованы ленивым способом на базе метода последовательных уступок между критериями оперативности (2) и качества получаемой информации (3). В качестве начального значения границы x , до которого повышение качества съемки может компенсировать ухудшение оперативности, устанавливается конец горизонта планирования t_k^{end} .

В ходе работы метода вначале выбирается очередная видимость между МКА и ППИ $gsVis_i^j$, далее выполняется последовательный поиск видимостей МКА-ПИ,

предшествующих данной видимости, начиная с самой ближайшей к моменту передачи данных, $\{targetVis_i^k | targetVis_i^{kEnd} \leq gsVis_i^{jStart}\}$. При нахождении очередного варианта размещения o_{kl} , для которого значение ЦФ заявки OF_k (1) больше текущего, выполняется пересчет границы x . Для этого выполняется оценка отличия текущего значения разрешения получаемого изображения от его максимально возможного:

$$\Delta Res = \frac{maxRes_k - res_k}{maxRes_k - minRes_k}$$

Полученное значение нормируется в соответствии с весовым коэффициентом критерия c_2^k : $\Delta Res^N = c_2^k \Delta Res$. После чего значение x рассчитывается по формуле:

$$x = t_k^{dropEnd} + \frac{1}{c_1^k} (t_k^{end} - t_k^{start}) \Delta Res^N. \quad (4)$$

Если есть следующая видимость между МКА и ППИ в интервале от конца текущей и границы x , то для нее выполняется аналогичный поиск. В случае нахождения варианта размещения o_k'' лучше текущего o_k' : $OF_k(o_k'') > OF_k(o_k')$, то $o_k' = o_k''$, оценка граничного времени x подвергается пересчету и интервал поиска сокращается.

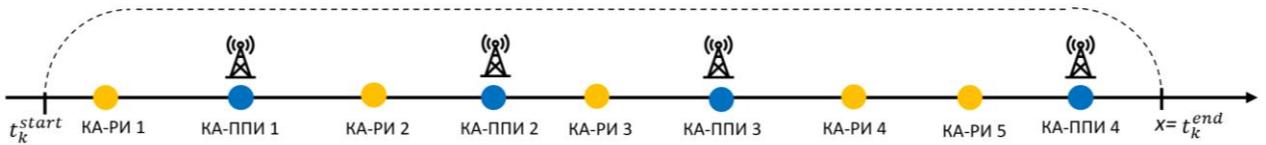
На рисунке 3.5 показан пример формирования вариантов возможного размещения. На первой схеме показан первоначальный интервал поиска с указанием видимостей КА-РИ и КА-ППИ. После выбора первого варианта размещения КА-РИ 1 и КА-ППИ 1 производится пересчет границы x . Затем переходим к следующему варианту размещения КА-РИ 2 и КА-ППИ 2, значение ЦФ в котором меньше чем у первого, поэтому граница x не пересчитывается. Далее переходим к третьему варианту, значение ЦФ, в котором больше первого, поэтому пересчитываем границу x . Т.к. вариантов на рассматриваемом интервале больше нет, завершаем поиск.

По окончанию поиска выполняется попытка применения o_k' к расписанию. В случае отсутствия конфликтов с другими заказами $o_k' \cap t_p^o = \emptyset, k \neq p$ данный вариант применяется к расписанию $o_k' \rightarrow t_k^o$. В противном случае выполняется поиск следующего варианта. Для этого текущий вариант размещения o_k'

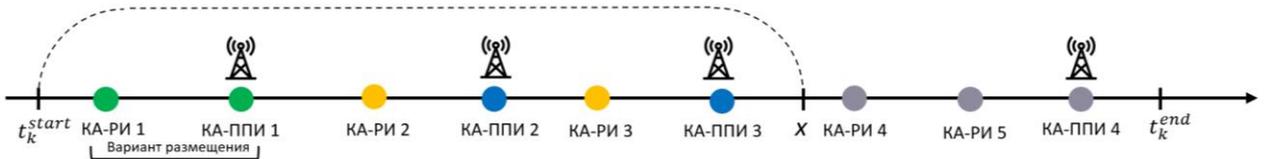
исключается из рассмотрения и берется следующий за ним найденный вариант, для которого производится расчет граничного времени x и на полученном интервале поиск продолжается.

Поиск вариантов возможного размещения для заявки продолжается до тех пор, пока агент $oAgent_k$ не смог разместиться в расписании (найден t_k^0), или не рассмотрены все видимости $targetVis_i^k$ на горизонте планирования заявки $t_k = [t_k^{start}; t_k^{end}]$ (в этом случае заявка считается незапланированной).

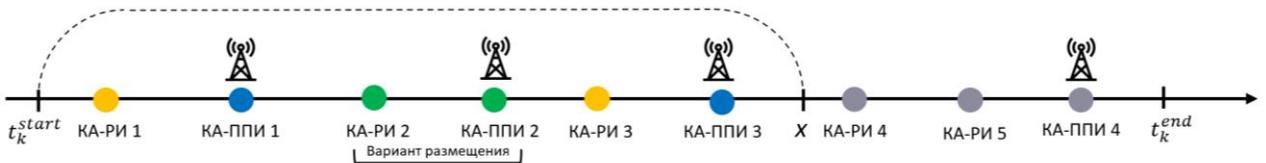
1. Первоначальный интервал поиска



2. Выбор первого варианта размещения КА-РИ 1 и КА-ППИ 1, пересчет границы x



3. Выбор следующего варианта размещения КА-РИ 2 и КА-ППИ 2, $SF_k(o_{k2}) < SF_k(o_{k1})$, граница x не пересчитывается



4. Выбор следующего варианта размещения КА-РИ 3 и КА-ППИ 3, $SF_k(o_{k3}) > SF_k(o_{k2})$, граница x пересчитывается, конец поиска

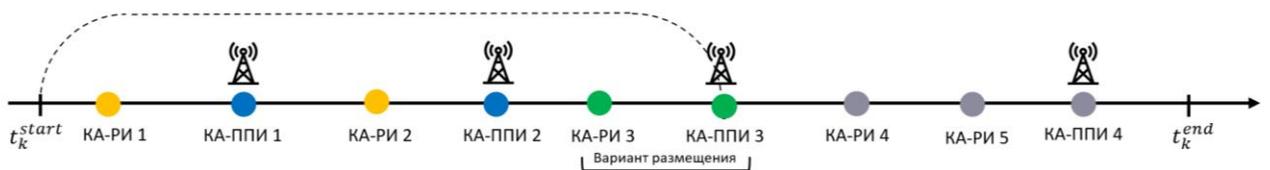


Рисунок 3.5 – Пример формирования вариантов возможного размещения

Псевдокод стадии бесконфликтного планирования представлен на рисунке 3.6.

Вследствие выполнения параллельных вычислений, найденный агентом вариант размещения O_k^0 может оказаться не актуальным, если в часть расписания, связанную с размещением, внесены изменения другим активным агентом $t_k^0 \cap t_p^0 \neq \emptyset, k \neq p$. В таком случае выполняется повторный поиск варианта для размещения.

Алгоритм 1 Стадия бесконфликтного планирование**Вход:** заявки, вариантыРазмещения**Выход:** начальное допустимое расписание

```

1.   сгруппированныеЗаявки = группировка(заявки, 'приоритет')
2.   сортировка(сгруппированныеЗаявки, 'приоритет', 'поУбыванию')
3.   расписание = создатьПустоеРасписание()
4.   for группаЗаявок in сгруппированныеЗаявки
5.       for заявка in группаЗаявок
6.           вариантыРазмещенияЗаявки = вариантыРазмещения[заявка]
7.               for вариантРазмещения in вариантыРазмещенияЗаявки
8.                   конфликты = поискКонфлСДрЗаявками(вариантРазмещения)
9.                   if конфликты.пусто
10.                       размещение = создРазм(вариантРазмещения, заявка)
11.                       расписание.добавить(заявка, размещение)
12.   return расписание

```

Рисунок 3.6 – Псевдокод стадии бесконфликтного планирования

На стадии разбора конфликтов (Рисунок 3.7) выполняется итерационное улучшение расписания, полученного на предыдущем шаге, путем разрешения конфликтов между заявками, возникающих при размещении. Агент заявки $oAgent_k$ пытается повысить значение своей функции удовлетворённости SF_k (5), путем размещения на более выгодном для него варианте.

$$SF_k = 1 - \frac{OF_k(o_k) - OF_k(o_k^*)}{OF_k(o_k^*)}, \quad (5)$$

где SF_k – функция удовлетворенности агента заявки, $E(SF_k) = [0;1]$, o_k^* – лучший варианта размещения, o_k – текущий вариант размещения.

На первой итерации формируется очередь из всех агентов заявок, упорядоченная по возрастанию значения их функции удовлетворенности (5) $\{oAgent_k | k \neq m, SF_k(t_k) \leq SF_m(t_m)\}$. На последующих итерациях в очередь помещаются заявки, потенциально затронутые перестановками на предыдущей итерации (агенты, изменившие свое размещение, и близко расположенные к ним агенты). Запуск агентов выполняется параллельно аналогично бесконфликтной стадии. Протокол переговоров агентов входе разбора конфликтов представлен на рисунке 3.8.

Алгоритм 2 Стадия разбора конфликтов

Вход: заявки, расписание

Выход: расписание с улучшенной ЦФ

```

1:   агентыЗаявок = создатьАгентов(заявки, расписание)
2:   repeat
3:     очередьЗаявок = создатьОчередь(агентыЗаявок)
4:     сортировка(очередьЗаявок, 'значениеЦФ', 'поВозрастанию')
5:     пулПотоков = создатьПулПотоков()
6:     while очередьЗаявок.неПуста
7:       агентЗаявки = очередьЗаявок.взятьПервыйЭлемент()
8:       if агентЗаявки.удовлетворенность == 1 continue
9:       результатПроактивности = пулПотоков.выполнить(агентЗаявки
           .проактивность)
10:      if результатПроактивности.успешно
11:        обновитьЦФ(результатПроактивности.измененныеЗаявки)
12:        сортировка(очередьЗаявок, 'значениеЦФ', 'поВозрастанию')
13:      until были перестановки в расписании

```

Рисунок 3.7 – Псевдокод базового метода стадии разбора конфликтов

В ходе своей активности агент заявки $oAgent_k$ предлагает конфликтующим с ним агентам заявок $\{oAgent_i \mid i \neq k, t_i^o \cap t_p^o \neq \emptyset\}$ найти другой вариант для размещения. В качестве максимальной компенсации за перемещение выступает приращение функции удовлетворенности агента, инициировавшего перемещение, $\Delta SF_k = SF_k(\tilde{o}_k) - SF_k(t_k^o)$, где \tilde{o}_k – новый вариант размещения. При получении сообщения с просьбой сместиться, агент конфликтующей заявки $oAgent_i$ выполняет попытку найти для себя новый вариант размещения \tilde{o}'_i , используя предоставленную компенсацию ΔSF_k . Цепочка перестановок считается успешной, если агент активного заказа $oAgent_k$ может компенсировать потери всем конфликтующим агентам за счет достигаемого прироста ΔSF_k :

$$\Delta SF_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta SF_i > 0.$$

В случае успеха переговоров найденные перестановки применяются к расписанию $o'_k \rightarrow t_k^o$, а затронутые ими агенты добавляются в очередь на последующее разрешение конфликтов. Дальнейшее разрешения конфликта

продолжаются вложенными переговорами по тому же протоколу. Перемещение затрагиваемых заявок продолжается до тех пор, пока очередная сдвигаемая заявка $oAgent_i$ не сможет найти новый вариант для размещения o'_i или не будет превышено ограничение на глубину вложенных переговоров (число переговоров в цепочке). Во избежание циклических перестановок предусмотрен механизм «табу-списка», в него помещаются пары агентов $oAgent_y$ и $oAgent_u$, совершивших перестановку в ходе активности агента $t_y^o \leftrightarrow t_u^o$, которым запрещается совершать обратные перестановки $t_u^o \leftrightarrow t_y^o$ в ходе текущей итерации.

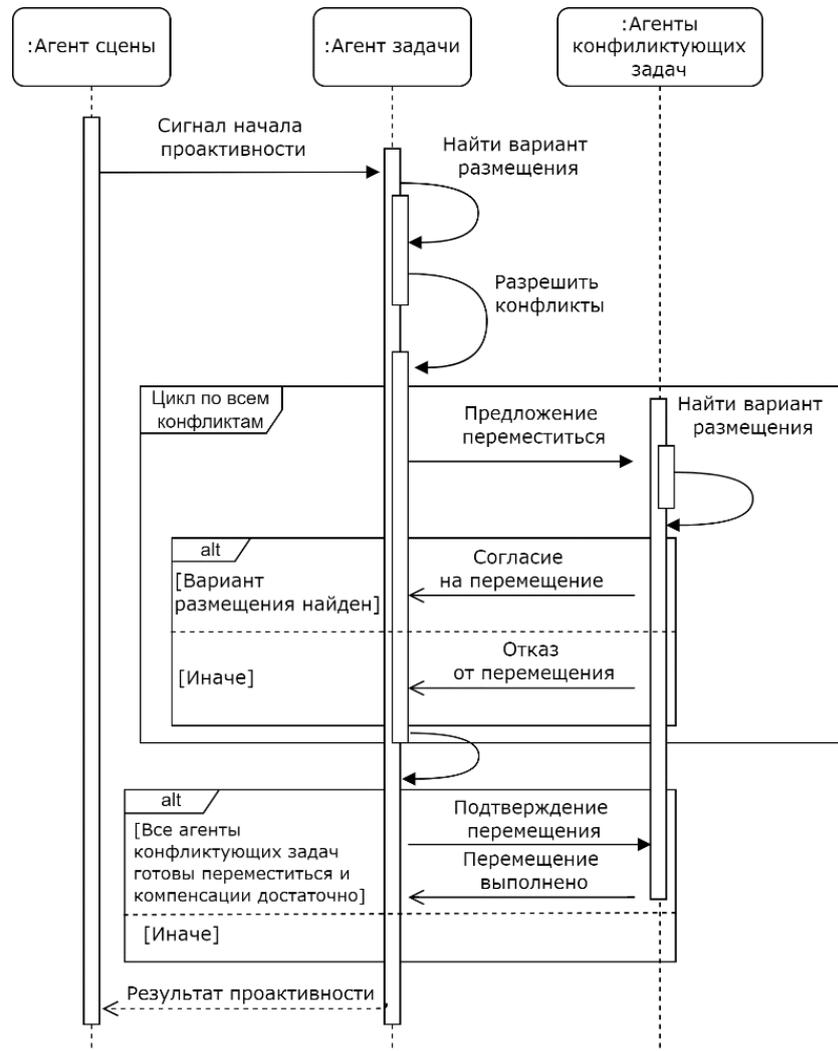


Рисунок 3.8 – Протокол переговоров агентов входе разбора конфликтов

Запуск агентов на выявление и разбор конфликтов осуществляется итерационно до тех пор, пока не вышло время, отводимое на построение расписания, или достигнуто условие конкурентного равновесия, которое состоит в том, что для любого агента $oAgent_k$ больше не находится такого варианта o'_k ,

размещение на котором привело бы к приросту удовлетворенности ΔSF_k , что смогло бы компенсировать суммарные потери остальных агентов $oAgent_i$, затронутых этим изменением и нашедших другой вариант размещения o'_i , минимизирующий их потери и согласующийся с ранее принятыми изменениями:

$$\Delta SF_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta SF_i < 0 \quad \forall k.$$

По достижению одного из указанных условий мультиагентная система приостанавливает свою работу, выдает перестроенное расписание всем участникам и переходит в режим ожидания новых событий таких как: добавление/удаление заявки, МКА, ППИ, изменение параметров ранее размещенной заявки, изменение доступности МКА/ППИ.

Особенность планирования заявки на площадную съемку r_n заключается в том, что для нее осуществляется предварительное разбиение на множество смежных областей R_v^n . При разбиении района наблюдения из группировки МКА выбирается некоторое множество аппаратов со схожими орбитальными параметрами. Далее определяются максимально возможные размеры полосы, которую может снять за один пролет МКА. Затем производится разбиение площадного района на полосы, совпадающие по направлению с траекторией движения МКА, с учетом ограничений на их взаимное перекрытие (Рисунок 3.9) [11]. После разбиения площадного РИ планирование его частей выполняется по представленному ранее методу до полного покрытия данного РИ.

По мере поступления в систему событий об изменении исходных данных для планирования, часть решения, затронутая изменениями, адаптивно корректируется путем проведения новых переговоров между соответствующими агентами заказов.

Кроме того, для возможности планирования ОГ МКА ДЗЗ был разработан ряд вспомогательных алгоритмов, связанных с предметной областью, таких как расчет циклограмм видимостей объектов. На рисунке 3.10 представлена блок-схема алгоритма поиска произвольного момента времени попадания РИ в зону видимости КА, реализованного на базе метода золотого сечения.

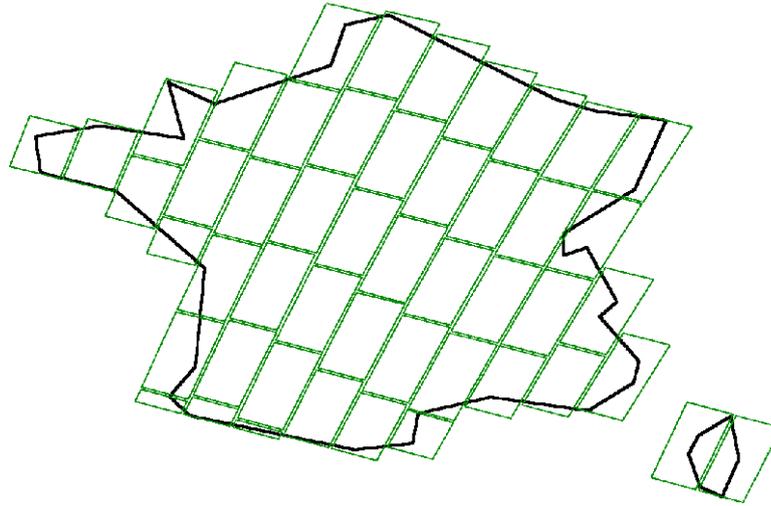


Рисунок 3.9 – Разбиение площадного района интереса на полосы

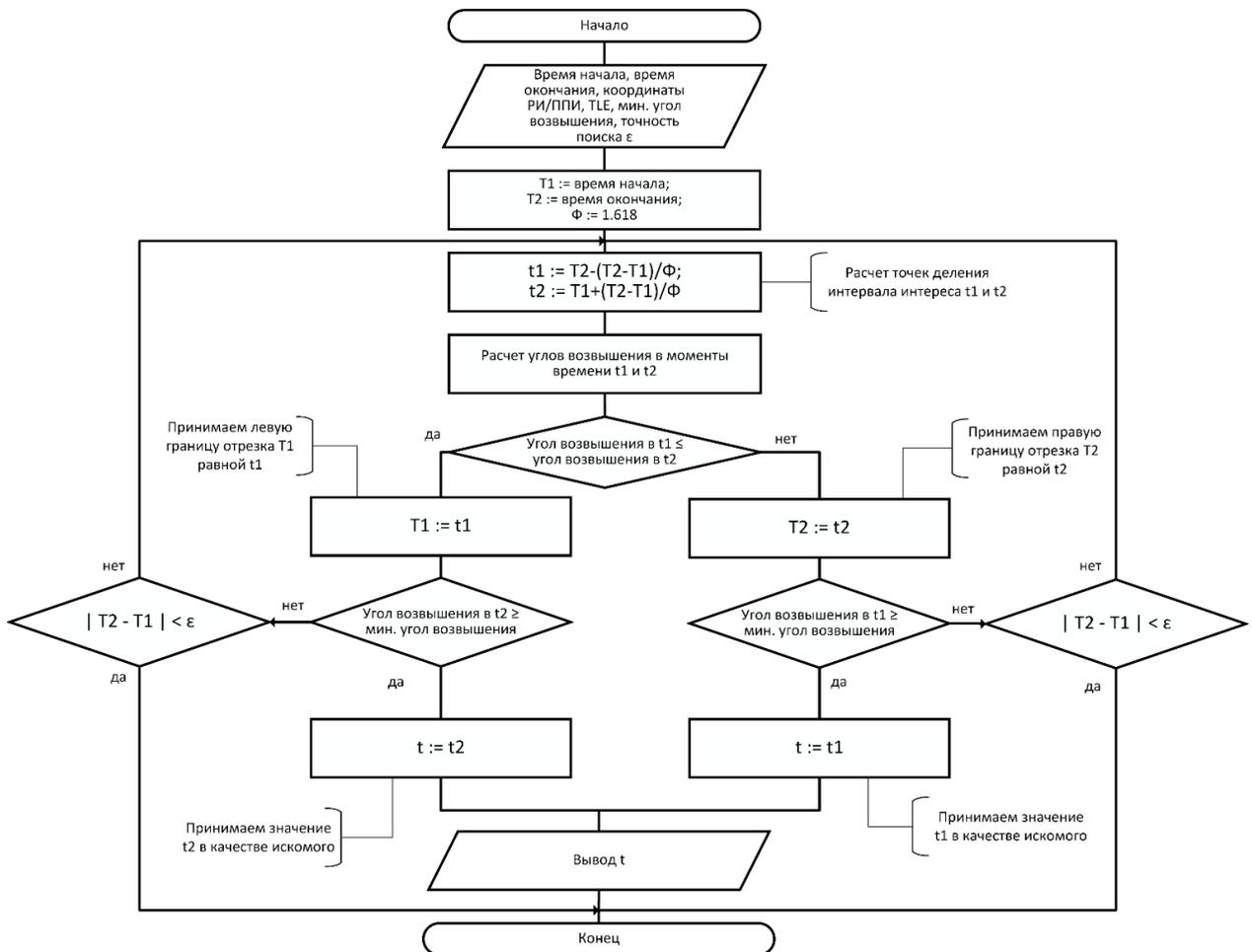


Рисунок 3.10 – Алгоритм поиска произвольного момента времени попадания РИ в зону видимости КА

Вначале производится расчет периода обращения МКА вокруг Земли T_i^{circ} . Затем интервал интереса $t^{plan} = [\min(t_k^{start}); \max(t_k^{end})]$, разбивается на

подынтервалы, равные по длительности периоде обращения МКА T_i^{circ} . Затем интервал интереса $t^{plan} = [\min(t_k^{start}); \max(t_k^{end})]$, разбивается на подынтервалы, равные по длительности периоду обращения МКА T_i^{circ} . Далее на каждом подынтервале осуществляется поиск видимости между МКА и объектом. Рассчитываются две точки $t1 = T2 - (T2 - T1)/\phi$, $t2 = T1 + (T2 - T1)/\phi$, где $T1$ – время начала, $T2$ – время окончания, $\phi = 1.618$. В данных точках оценивается углы возвышения МКА над объектом. Точка с меньшим углом возвышения становится новой границей подынтервала. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет найден угол, больше заданного, либо не достигнута указанная точность поиска $|T2 - T1| < \varepsilon$.

Также в разработанной мультиагентной системе реализован функционал по мониторингу исполнения заказов, который позволяет отслеживать своевременное исполнение построенного расписания и в случае срыва сроков автоматически запускать перепланирование заявок. На рисунке 3.11 представлена диаграмма состояний заявки.

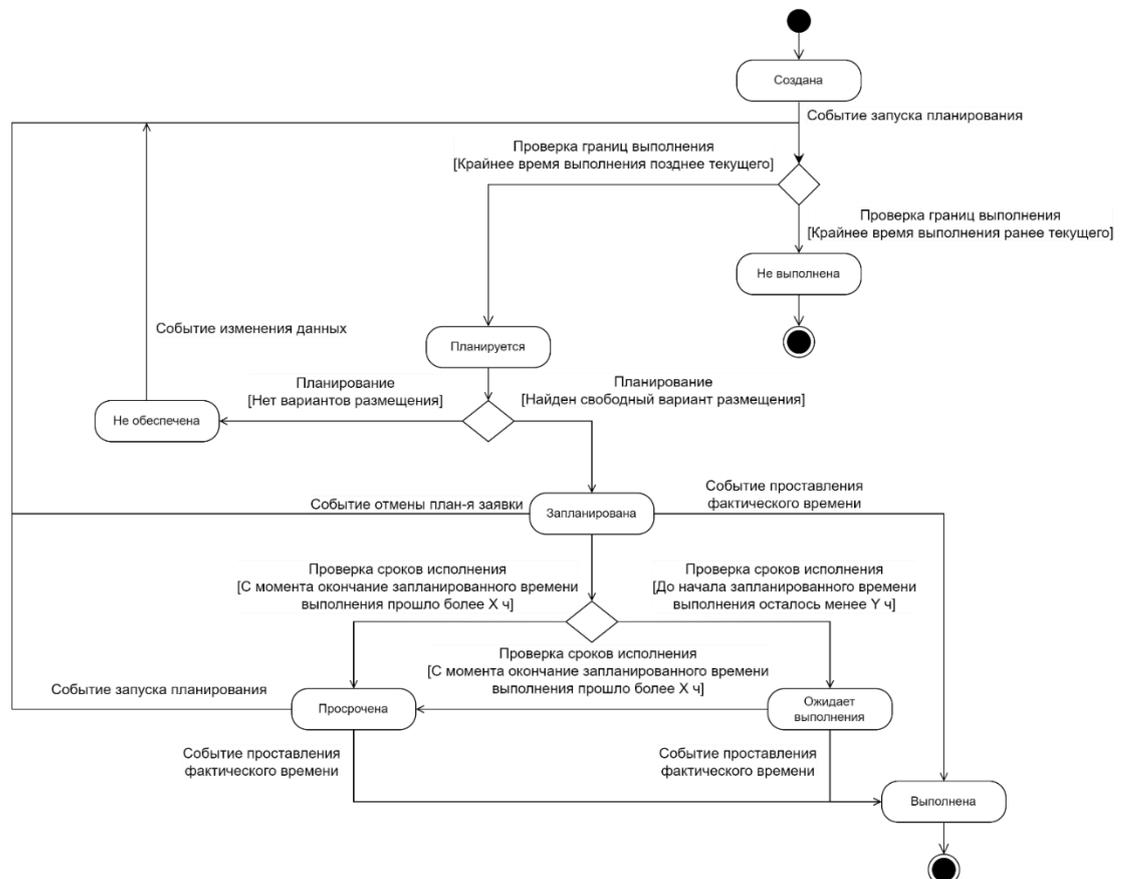


Рисунок 3.11 – Диаграмма состояний заявки

После того как до начала запланированного времени выполнения осталось менее Y ч заявка переходит в статус «Ожидает выполнение» и уже не может сдвигаться или вытесняться другими заявками. Если с момента окончания запланированного времени выполнения прошло более X ч и факт выполнения заявки не проставлен, осуществляется ее перепланирование на более поздний срок. В этом случае возможный период выполнения заявки становится равным $t_k = [t^{crt} + Y; t_k^{end}]$, где t^{crt} – текущее время системы.

3.4 Реакция на события

Определим логику реакции на системы на возникающие события:

1. *Добавление КА/ППИ* – Досчитываются возможные варианты размещения заявок. Перепланирование с учетом новых вариантов.
2. *Удаление КА/ППИ* – Распланируются заявки, которые были запланированы на этот ресурс. Удаляются варианты размещения, рассчитанные для этого ресурса. Перепланирование с учетом нового списка вариантов.
3. *Изменение объема памяти* – Если память уменьшилась, то на всей циклограмме использования памяти находим участки, превышающие новое значение. Распланируем самые «слабые» заявки. Перепланирование. Если увеличился объем, то запускается перепланирование.
4. *Добавление РИ* – Для нового РИ запускается планирование.
5. *Изменение приоритета РИ* – Перепланирование.
6. *Удаление РИ* – Попытка улучшить положение слабоудовлетворенных заказов за счёт освободившегося места.
7. *Добавление ограничения доступности ресурса* – Варианты размещения, которые пересекаются с добавленным ограничением, помечаются как недоступные. Запланированные на них заявки распланируются. Перепланирование.
8. *Удаление ограничения доступности ресурса* – Варианты размещения, которые пересекаются с удаленным ограничением, помечаются как доступные. Перепланирование.

9. *Добавление календаря для ресурса* – На основании календаря формируются ограничения доступности. Варианты размещения, которые пересекаются с этими ограничениями, помечаются как недоступные. Запланированные на них заявки распланируются.

10. *Удаление календаря для ресурса* – Удаляются ограничения, которые были связаны с календарем. Варианты размещения, которые пересекаются с удаленными ограничениями, помечаются как доступные. Перепланирование.

11. *Изменение коэффициента ЦФ* – Пересчет вариантов размещения. Перепланирование

3.5 Выводы

В рамках третьей главы получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрен мультиагентный подход к решению задачи планирования ресурсов ОГ МКА ДЗЗ.

2. Предложена модель данных системы ДЗЗ, в качестве основных понятий которой выбраны: ресурс (КА и ППИ), заявка на съемку РИ (точечного и площадного), операция (съемка, сброс, получение), что обеспечить настройку системы на конкретное применение.

3. Предложена модификация метода компенсации для адаптивного планирования целевого применения многоспутниковой группировкой МКА ДЗЗ для съемки точечных и площадных РИ. Данный подход является развитием решения, предложенного в работах предшественников, путем ввода ряда промежуточных вычислений, усовершенствования архитектуры мультиагентной системы, а также введения дополнительных эвристик, позволяющих значительно уменьшить сложность комбинаторного перебора при поиске решения.

4. Разработанный метод отличается применимостью для планирования большого числа заказов, адаптивностью работы по событиям, поступающим в реальном времени, и допускает расширение числа критериев, предпочтений и ограничений, которые могут приниматься в расчет при построении расписаний.

4 РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

В данной главе приводится функциональная архитектура разработанной цифровой платформы с описанием функций основных модулей, а также показывается реализация сервиса планирования.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [14, 53, 54, 56, 58].

4.1 Архитектура и функции цифровой платформы

В ходе исследования были изучены указанные выше системы управления группировками и предложена базовая архитектура цифровой платформы согласованного планирования целевого применения группировок МКА дистанционного зондирования Земли [9, 54].

На рисунке 4.1 представлена предложенная архитектура цифровой платформы.

В состав платформы входят следующие основные модули:

- программный модуль взаимодействия с потребителями услуг ДЗЗ;
- программный модуль взаимодействия с операторами КА;
- программный модуль взаимодействия с операторами ППИ;
- сервис стратегического планирования ОГ МКА ДЗЗ;
- программный модуль управления обработкой результатов съемки, позволяющий динамически подключать дополнительные сервисы по обработке снимков ДЗЗ. В качестве примера таких сервисов выступают [53, 56, 58]:
 - сервис оценки всхожимости посевов озимых культур по снимкам ДЗЗ;
 - сервис построения цифровой модели рельефа сельскохозяйственных полей по снимкам ДЗЗ;
 - сервис расчета вегетационных индексов по мультиспектральным снимкам;
 - сервис выявления зон неоднородностей сельскохозяйственных полей по снимкам ДЗЗ;

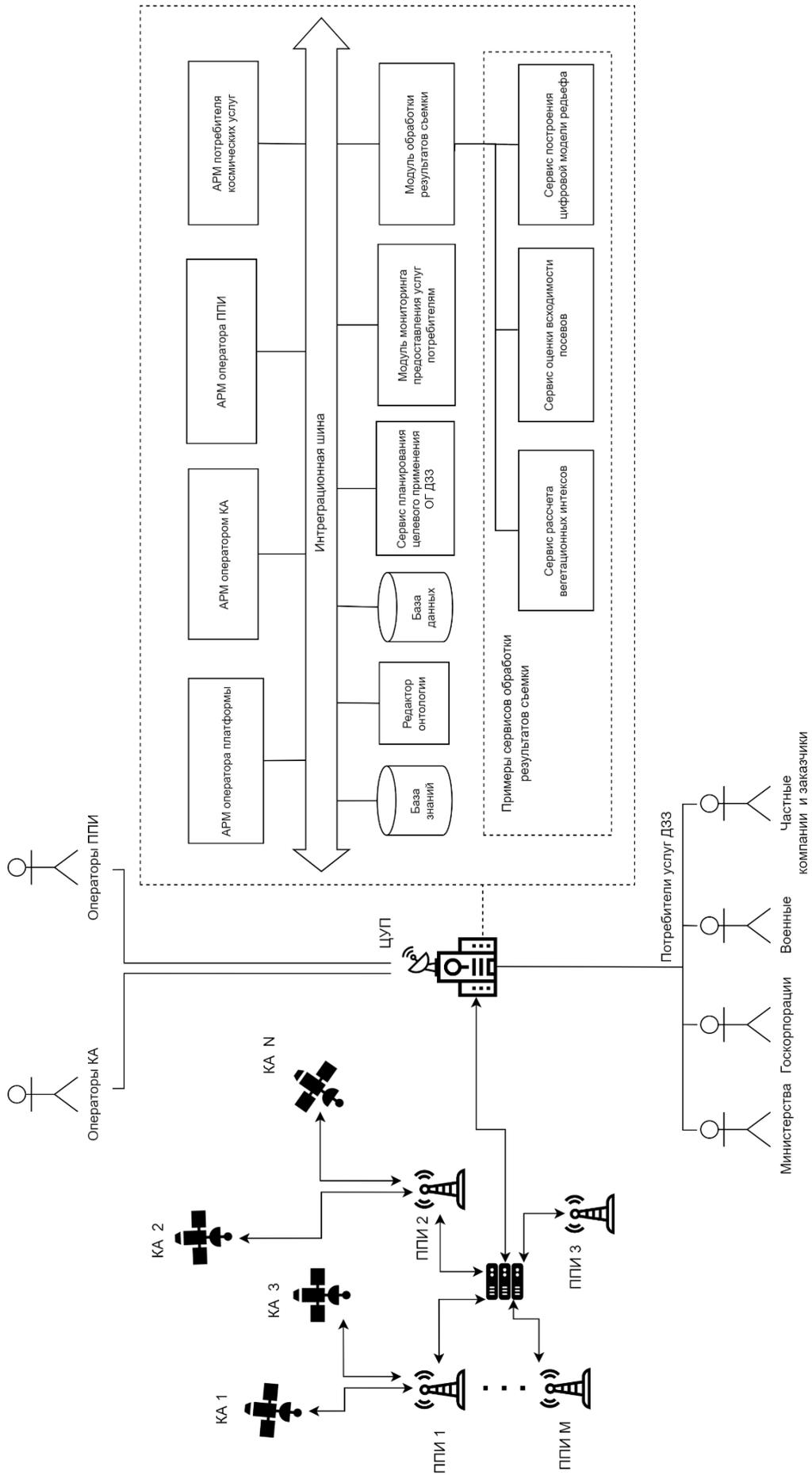


Рисунок 4.1 – Архитектура цифровой платформы

- программный модуль мониторинга процесса предоставления услуг потребителям;
- база данных снимков, получаемых со средств ДЗЗ;
- редактор онтологий.

При поступлении заявки на выполнение услуги из базы данных запрашиваются параметры, необходимые для ее выполнения. Пользователь вводит дополнительные данные, связанные с выбранной услугой. Так выполняется функция регистрации новой заявки, на выходе которой формируется задача на выполнение. Далее осуществляется стратегическое планирование, на основе информации о доступных КА и ППИ и их оборудовании, а также требований к выполнению данной услуги. Утвержденный план отправляется на модуль мониторинга, который осуществляет контроль своевременного получения снимков со средств ДЗЗ. При поступлении требуемых снимков формируются задания на их обработку, поступающие на вход функции обработки результатов съемки. Если снимки не получены вовремя, то формируется сообщение о недополучении и осуществляется перепланирование. Обработанные снимки помещаются в базу данных снимков, а информации полученная в результате обработки возвращается на блок контроля. Там модуль мониторинга проверяет соответствуют ли результаты ожидаемым. Если нет, то формируется заявка на проведение дополнительных операций, поступающая на блок стратегического планирования.

При проведении стратегического планирования сначала формируется список операций для выполнения заявки на основе знаний о предоставляемой услуге. Далее, исходя из полученного списка операций, а также требований к ресурсам по получению необходимых снимков и к сервисам по их обработке модуль стратегического планирования формирует задачи на съемку средствами ДЗЗ, на основании которых уже строится план технологических операций по получению снимков. При этом учитываются знания о технологических процессах получения снимков со средств ДЗЗ и данные о доступных КА и ППИ. Если все задачи на съемку удалось запланировать, то формируется список задач по обработке

снимков. Иначе, составление плана выполнения операций по получению результатов ДЗЗ выполняется заново.

Контролирование процесса предоставления услуг включает в себя контроль поступления снимков с внешних средств ДЗЗ в запланированный срок. Результаты съемки с КА и ППИ, обработанные снимки хранятся в базе данных снимков. При загрузке/удалении снимков формируется соответствующее сообщение. Если был загружен снимок, полученный средствами ДЗЗ, то на основании списка задач по обработке модуль мониторинга выполнения услуг потребителя формирует задания на обработку. Если был загружен уже обработанный снимок, то оценивается информация, полученная в результате обработки. В случае выявления при анализе отклонений от нормы, формируется заявка на выполнение дополнительных операций.

4.2 Функциональные возможности и требования, предъявляемые к прототипу сервиса планирования

Разработанный прототип сервиса планирования предназначен для составления и адаптивного перестроения плана выполнения заявок на объектовую и площадную съемку средствами ОГ МКА ДЗЗ при заданных критериях эффективности и технических характеристиках МКА и ППИ.

В прототипе реализованы следующие основные функции:

- загрузка исходных данных;
- загрузка заявок на объектовую и площадную съемку ;
- формирование плана работы ОГ ДЗЗ;
- адаптивное перестроение плана работы ОГ ДЗЗ по событиям;
- визуальное моделирование построенного плана на трехмерной модели Земли;
- формирование бизнес-радаров;
- выгрузка полученного плана работы ОГ ДЗЗ.

На рисунке 4.2 изображена диаграмма вариантов использования прототипа системы в нотации UML.

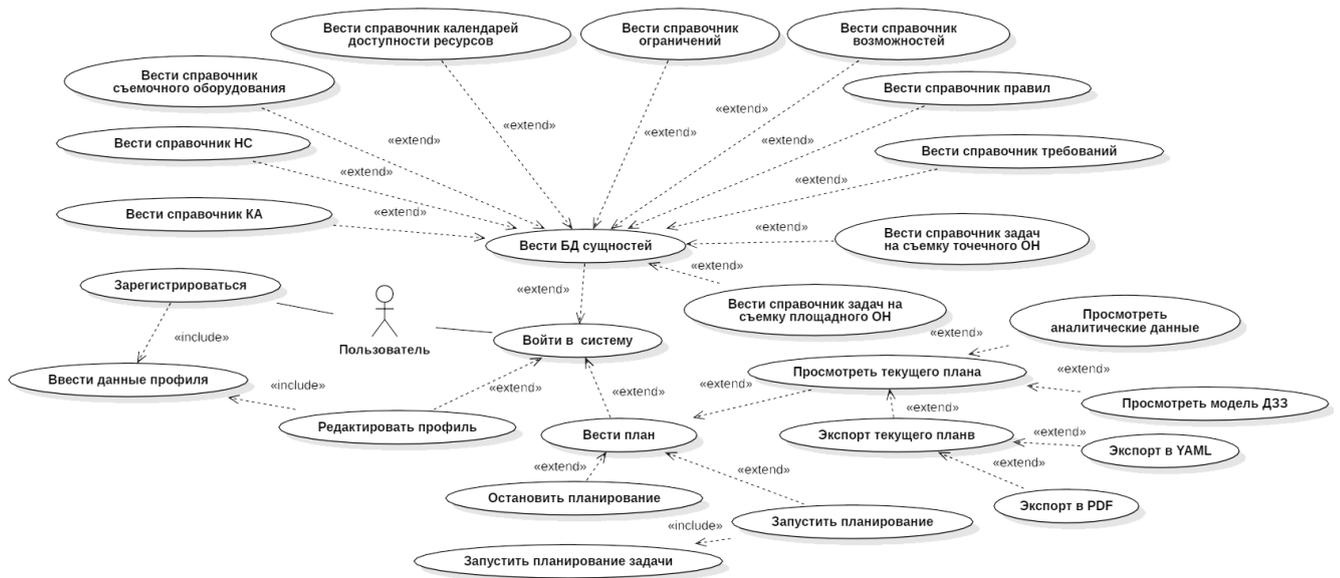


Рисунок 4.2 – Диаграмма вариантов использования прототипа системы

К системе предъявляются следующие нагрузочные требования:

- производить расчет плана на горизонт до 28 суток;
- выполнять размещение заявок на съемку не позднее чем 90 мин после их поступления в систему;
- поддерживать создание плана работы для ОГ ДЗЗ, состоящей не менее чем из 30 КА и 60 ППИ;
- обеспечивать планирование не менее чем для 20 тыс. заявок на съемку точечных РИ.

4.3 Архитектура прототипа сервиса планирования

Разработанный прототип сервиса планирования целевого применяй ОГ ДЗЗ имеет сетевую клиент-серверную архитектуру (Рисунок 4.3) [14]. Для написания серверной части использовался фреймворк Spring (язык Java) [60]. Для создания пользовательского интерфейса был применен фреймворк Vue.js (язык JavaScript) [70]. В качестве системы управления базами данных используется СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS [81]. При реализации алгоритмов расчётов положения КА и зон их радиовидимости с ППИ на заданные моменты времени, применяется низкоуровневая библиотека динамики пространства Orekit (ORbits Extrapolation KIT), имеющей открытый исходный код на Java [74].

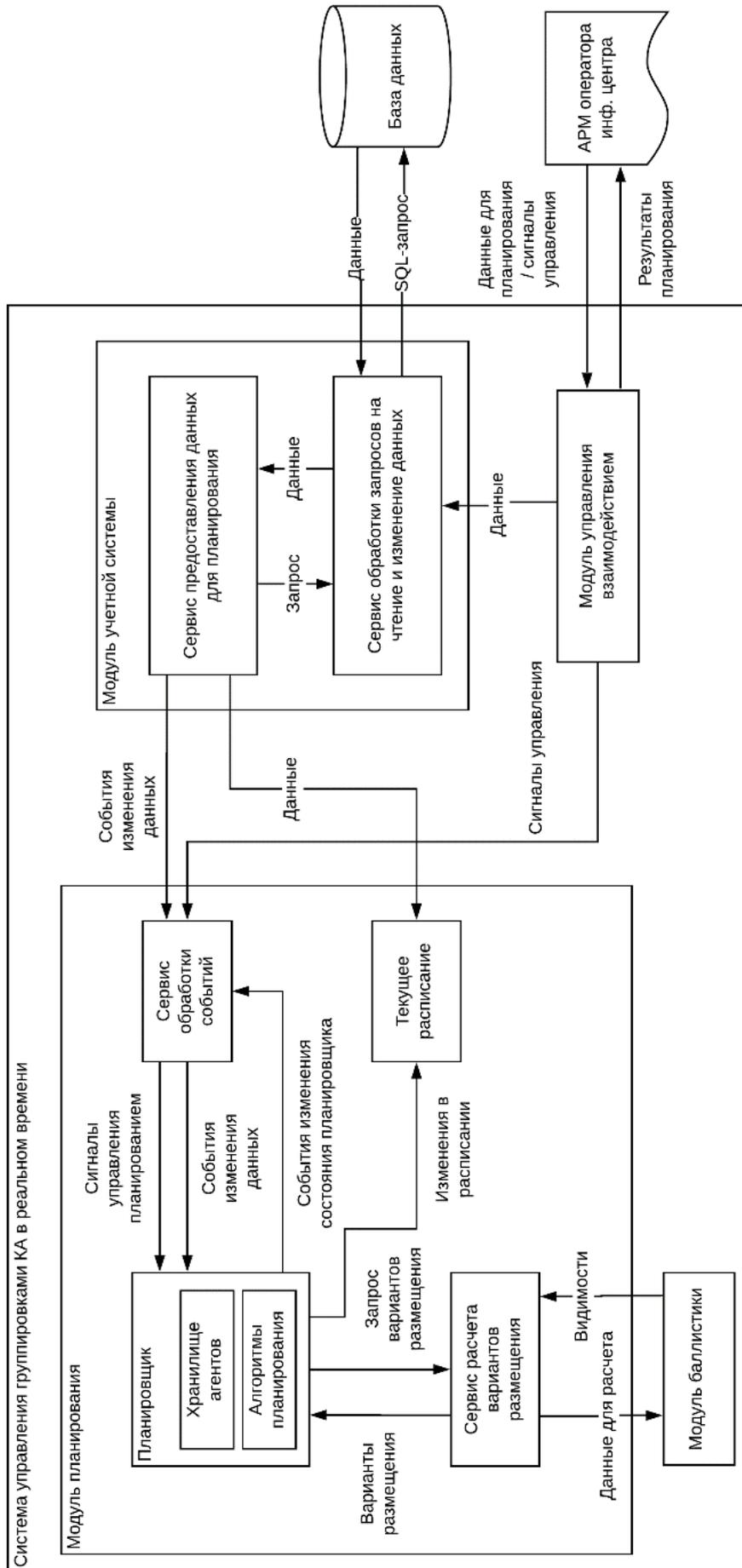


Рисунок 4.3 – Архитектура сервиса планирования для цифровой платформы

Автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора информационного центра предназначено для ввода исходных данных по целевой обстановке ОГ МКА ДЗЗ и заявок на съемку РИ, управления планированием, просмотра результатов и бизнес-радаров.

Модуль учетной системы обеспечивает взаимодействие с сервером базы данных. Включает в свой состав *сервис обработки запросов на чтение и изменение данных*, выполняющий запросы к базе данных (БД), а также *сервис предоставления данных планировщику*, который преобразовывает данные из БД в формат планировщика.

База данных используется для хранения исходных данных и результатов планирования.

Модуль баллистики обеспечивает: расчет интервалов видимости ППИ-МКА и РИ-МКА, расчет орбит МКА на заданный промежуток времени.

Текущее расписание представляет собой объектную структуру, отражающую построенный план выполнения операций.

Модуль управления взаимодействием осуществляет маршрутизацию и преобразование информационных потоков между системой и внешней средой.

В состав *модуля планирования* входят следующие основные элементы:

- *Планировщик*, выполняющий адаптивное планирование при помощи ранее описанных методов.
- *Сервис обработки событий* отвечает за получение и обработку внешних и внутренних событий планировщиком.
- *Сервис расчета вариантов размещения* по запросу планировщика выполняет генерацию возможных вариантов.

4.4 Пользовательский интерфейс прототипа

Пользовательский интерфейс системы представляет собой одностраничное веб-приложение, обеспечивающее следующие основные функции:

- Отображение состава и параметров группировки;

- Физический мир. Содержит 3D-визуализацию Земли с изображением траекторий орбит КА, расположения ППИ и РИ;
- Текущие задачи миссии. Содержит перечень РИ с указанием их характеристик;
- План действий группировки. Содержит план съемки РИ группировкой КА, представленный в виде диаграммы Ганта, а также передачи информации на ППИ;
- Лог принятия решений. Содержит перечень сообщений, отправленных агентами в процессе построения расписания, с указанием принятых решений и уступками в ходе переговоров;
- Очередь событий. Содержит упорядоченный по времени возникновения список событий, сформированный на основе введенных пользователем возмущений;
- Целевые показатели. Содержит в виде графиков текущую удовлетворенность системы в целом и каждого агента в отдельности;
- Результаты миссии. Содержит количество запланированных задач, загруженность КА и пунктов приема информации, а также оценку результативности и эффективности миссии;
- Терминал для создания начальной сцены группировки. Предназначен для конструирования группировки КА и ППИ из базы знаний с заданными характеристиками, а также ввода событий и возмущений, связанных с выходом из строя оборудования КА и ППИ;
- Терминал для ввода задач миссии. Предназначен для добавления, удаления и редактирования характеристик РИ.

На рисунке 4.4 представлен экран с данными о ППИ, содержащий информацию о географическом положении пункта, скорости приема данных и угле раствора.

На рисунке 4.5 изображен экран с результатами планирования. В верхней части находится график использования памяти МКА. В нижней – план-график операций для каждого МКА и ППИ.

Добавить		10	1					
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Название	Скорость приема, ГБ/сек	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	Угол раствора, град
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Наземная станция приема 1	0.5	30	30	0	0
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Наземная станция приема 2	0.5	40	40	0	0
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Наземная станция приема 5	0.5	60	60	0	0
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Наземная станция приема 3	0.5	-40	-40	0	0
<input type="checkbox"/>	>	<input checked="" type="checkbox"/>	Наземная станция приема 4	0.5	-50	-50	0	0

Рисунок 4.4 – Экран с данными о ППИ для планирования

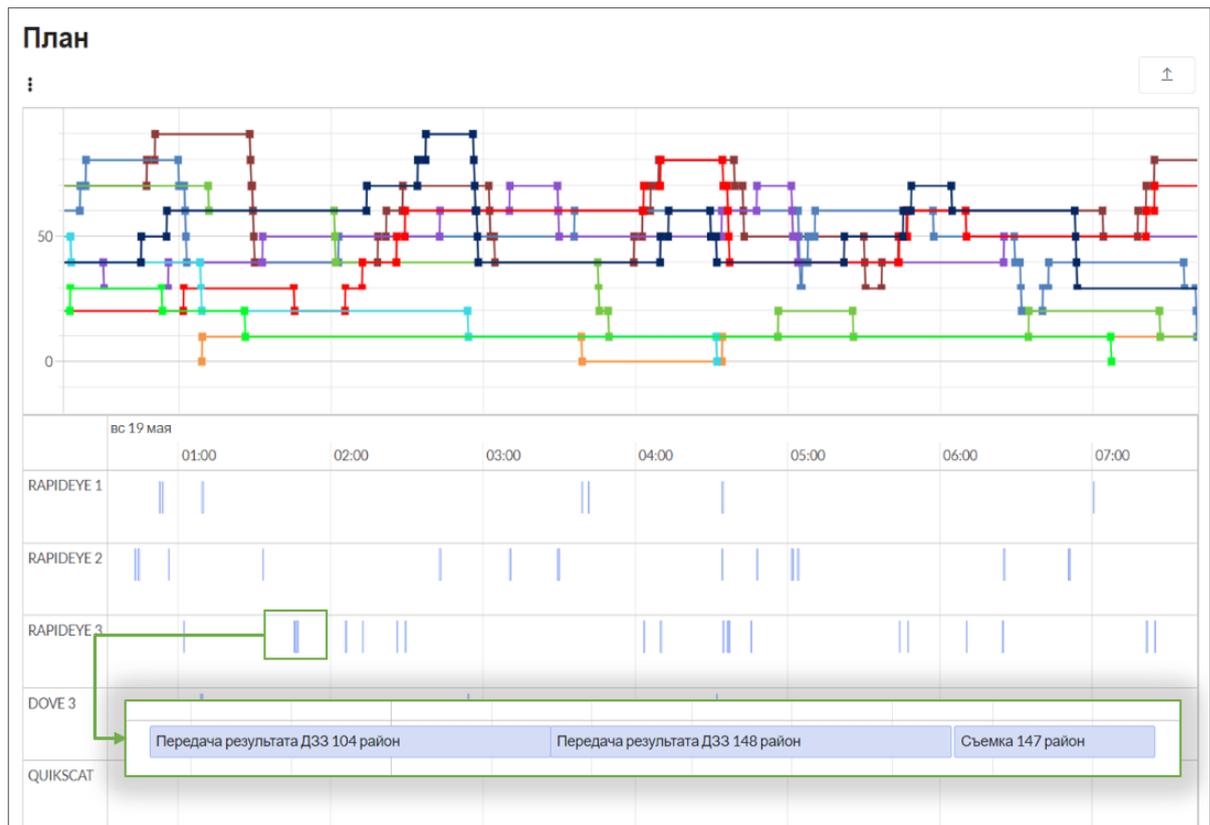


Рисунок 4.5 – Экран с результатами планирования

На рисунке 4.6 представлен экран с физической моделью мира, представляющую собой трехмерную модель Земли с расположенными вокруг нее МКА на орбитах, а также отмеченными на ней РИ и ППИ. В ходе моделирования визуализируются процессы выполнения операций. В нижней части экрана отображается очередь ближайших запланированных операций и виджет управления модельным временем.

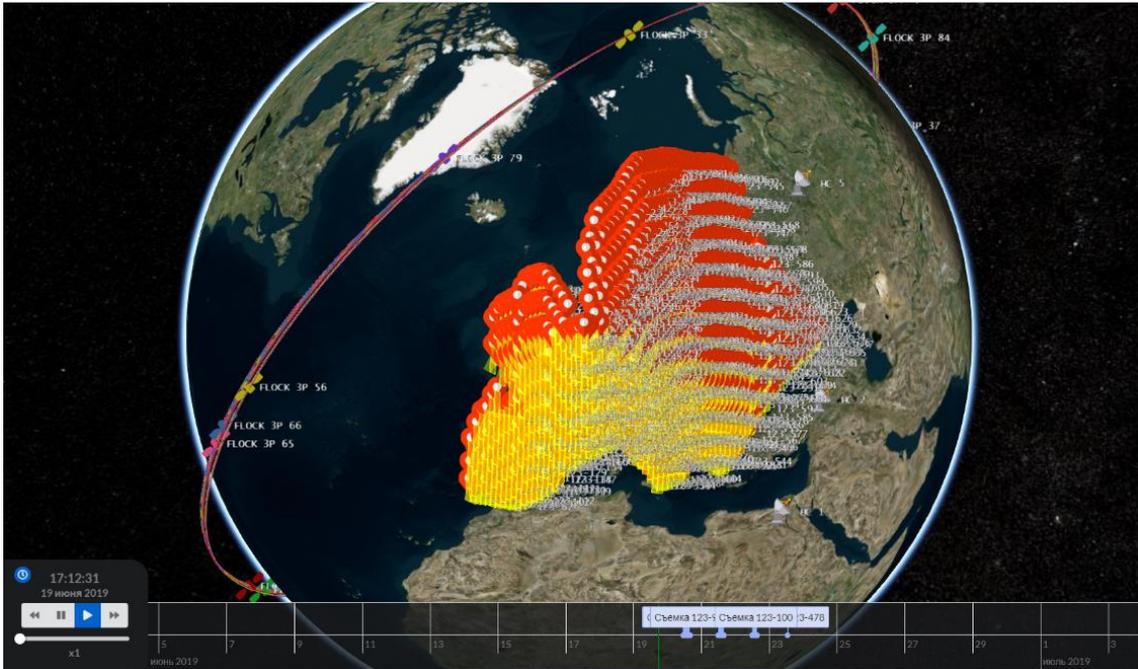


Рисунок 4.6 – Экран с физической моделью мира

На экране с аналитической информацией (Рисунок 4.7) отображаются бизнес-радары, позволяющих дать оценку качества полученного расписания и проанализировать ход его построения, такие как, например, график с историей изменений целевой функции и диаграмма перестановок агентов на каждой итерации.

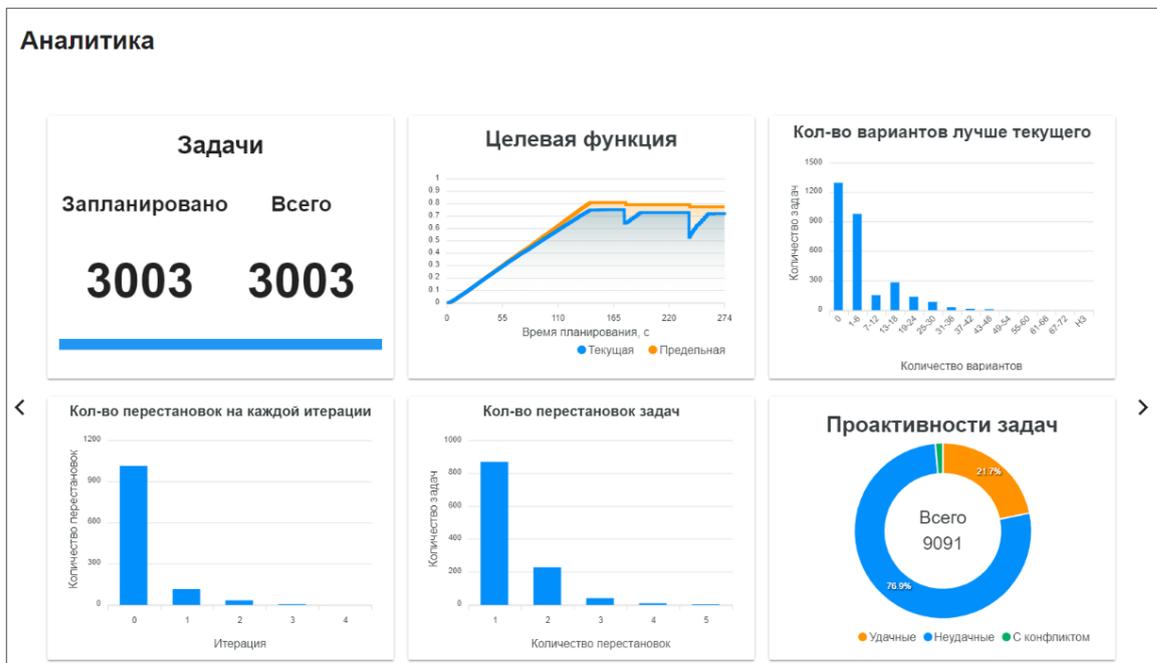


Рисунок 4.7 – Экран с аналитической информацией

В Приложении А представлен листинг основных классов разработанного модуля планирования.

4.5 Выводы

В рамках четвертой главы получены следующие основные результаты:

1. Разработана архитектура цифровой платформы управления группировкой МКА ДЗЗ, позволяющую потребителям через «одно окно» подавать запросы на съемку интересующих их РИ, согласованно планировать МКА и ППИ, переданные в управление платформе, и доставлять результаты ДЗЗ потребителям.

2. Рассмотрены функциональные возможности и требования, предъявляемые к прототипу сервиса планирования. В качестве основных из них можно выделить: переносимость, универсальность, масштабируемость и модульность.

3. Разработана архитектура сервиса планирования для цифровой платформы управления группировкой МКА ДЗЗ, обеспечивающего адаптивное построение расписания и его перестроение при внешних изменениях исходных данных.

4. Реализованы основные модули сервиса планирования, обеспечивающие работу с данными о целевой обстановке ОГ МКА ДЗЗ, а также решение поставленной задачи посредством применения мультиагентных технологий.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе приводится описание проведенных экспериментальных исследований с целью оценки характеристик разработанных методов и средств для решения поставленной задачи и их сравнения с известными методами планирования по качеству и производительности решения.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [55].

5.1 Методика экспериментальных исследований

Общий подход к тестированию мультиагентных систем, построенных на основе принципов самоорганизации, в настоящее время отсутствует. Мультиагентные разработки требуют создания специальной методологии тестирования сложных адаптивных систем, которая бы являлась частью «ноу-хау» разрабатываемых интеллектуальных систем реального времени.

Поведение таких систем может являться достаточно сложным, трудным разделимым на независимые части, зависящим от момента времени и требует разработки новой методологии управления, визуализации поведения и тестирования работы данных систем.

Основой такой новой методологии является теория сложных адаптивных систем, оперирующая такими понятиями, как аттракторы, порядок и хаос, неустойчивые равновесия (устойчивые неравновесия), катастрофы, осцилляции, бифуркации и ряд других.

Для построения сценариев тестирования рассматриваемых систем, демонстрирующих указанные выше феномены поведения, строятся специальные начальные ситуации, которые готовятся и просчитываются заранее, и формируется поток заданных или случайных событий (заказов), которые подаются на вход системы в определенные моменты времени, что требуется создания специального генератора событий во времени.

Исходные ситуации задаются набором заказов и ресурсов в их начальном состоянии или в виде уже связанной в сложное расписание структуры.

Первоначально система тестируется на простых модельных ситуациях и потоках заказов (событий), максимально покрывающих всю функциональность системы. Далее система тестируется на более сложных ситуациях, которые являются комбинацией более простых ситуаций.

Для оценки степени применимости разработанных методов и средств для решения поставленной задачи предлагается следующий набор экспериментальных исследований:

1. Исследование адаптивности планирования по событиям. Исследование реакции системы на такие события как: приход нового заказа, отзыв уже спланированного заказа, новый ресурс, недоступность ресурса.

2. Исследование влияния порядка прихода заказов. Необходимо исследовать степень зависимости итогового расписания от порядка поступления заказов в систему – чем меньше конечный результат зависит от порядка прихода событий, тем устойчивее система находит оптимум и тем выше качество планирования.

3. Исследование производительности. Оценить деградацию времени работы с увеличением числа заявок и ресурсов.

4. Анализ эффективности в сравнении с известными методами планирования.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась модель ОГ ДЗЗ, в состав космического комплекса которой входит группировка от 15 до 35 МКА в зависимости от эксперимента. Основные параметры модели ОГ ДЗЗ приведены в таблице 5.1. В Приложении Б представлен набор элементов орбиты космических аппаратов в формате TLE, использованный в ходе проведения экспериментов.

Моделировался случайный поток заявок на съемку РИ, распределенных по нормальному закону от экватора к полюсам, и результаты планирования подвергались автоматизированной обработке с участием экспертов [57]. Эксперименты проводились на ПК с ЦП Intel Core i7-3770 (4 ядра/8 потоков, 3.4ГГц) и ОЗУ 8Гб, под управлением операционной системы Windows 10.

Таблица 5.1 – Основные параметры модели ОГ ДЗЗ

Параметр	Значение
Количество КА	15, 25, 30, 35 (в зависимости от эксперимента)
Количество ППИ	10
Высота орбиты	500 км
Период совершения полного оборота КА вокруг Земли	90 мин
Угол крена КА	0° – 45°
Угол тангажа КА	0° – 45°
Объем памяти КА	900 Гб
Ширина полосы видимости КА	200 км
Ширина полосы съемки КА	45 км
Углы солнца	>10°
Скорость приема ППИ	500 Мб/с
Минимальный угол возвышения для ППИ	>10°

5.2 Исследование адаптивности

Для оценки способности метода к адаптации в качестве внешнего события моделировался отказ в работе одного из МКА. Модель ОГ ДЗЗ в данном эксперименте была представлена 5 КА типа «Конопус-В» [17] и сетью из 10 ППИ.

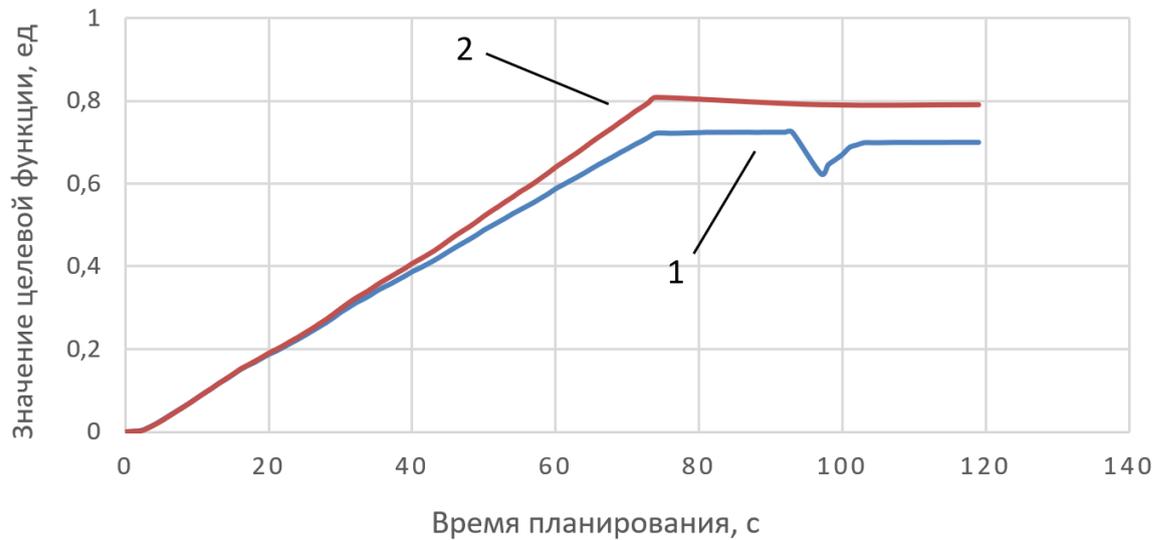
В ходе исследования проведена серия из 10 испытаний. Вначале эксперимента формировалось расписание по выполнению пакета из 3000 заявок на съемку РИ. По завершении планирования из системы исключался МКА, и измерялись, изменения значения целевой функции системы $OF = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N OF_k$ (6), время, затраченное на восстановление расписания, и количество перепланированных заявок.

Результаты эксперимента представлены в таблице 5.2. График изменения значения целевой функции системы в ходе одного из экспериментов представлен на рисунке 5.1.

Из результатов эксперимента видно, что выход из строя одного из МКА привел к резкому падению значения ЦФ системы в среднем на 0,1 и необходимости поиска новых вариантов размещения для 450 заявок. При восстановлении поврежденного расписания было перепланировано 443 заявки на другие МКА (98% от числа заявок, назначенных на удаленный МКА). В результате восстановления расписания значение ЦФ системы повысилось до 0,69, что меньше исходного всего на 0,04. Среднее время перепланирования при этом составило около 11 секунд. Результаты эксперимента демонстрируют, что применение мультиагентных технологий для управления ресурсами ОГ МКА ДЗЗ позволяет парировать возникновение разрушающих событий, приводящих к изменению постановки решаемой задачи.

Таблица 5.2 – Результаты эксперимента по исследованию способности системы к адаптации расписания

№	После выхода из строя МКА		После перестроения расписания		Время перепланирования, с
	Кол-во распланированных заявок	Δ целевой функции системы	Кол-во перепланированных заявок	Δ целевой функции системы	
1	464	-0,11	460	0,07	11
2	515	-0,11	512	0,08	12
3	468	-0,11	464	0,09	12
4	461	-0,1	459	0,06	11
5	452	-0,1	447	0,07	11
6	448	-0,11	436	0,06	10
7	437	-0,11	435	0,06	10
8	427	-0,1	414	0,05	13
9	417	-0,1	408	0,04	9
10	415	-0,07	409	0,05	10



1) Текущая целевая функция системы; 2) Предельная целевая функция системы

Рисунок 5.1 – График изменения значения целевой функции системы в ходе одного из экспериментов

5.3 Исследование влияния порядка прихода заявок

В данном исследовании оценивалась степень зависимости качества итогового расписания планирования от порядка поступления заявок в систему. Для этого выборка из 3000 заявок на съемку РИ была разбита на 15 равных частей по 200 заявок, после чего части перемешивались случайным образом и подавались на вход последовательно, после завершения планирования предыдущей порции. Общее время планирования не фиксировалось, так как процесс разрывался загрузкой новой порции данных.

Результаты серии из 10 экспериментов представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты экспериментов по исследованию влияния порядка прихода заказов

№	Количество запланированных заявок	Значение целевой функции системы
1	3000	0,73
2	3000	0,74
3	3000	0,76
4	3000	0,78

Таблица 5.3 (продолжение) – Результаты экспериментов по исследованию влияния порядка прихода заказов

№	Количество запланированных заявок	Значение целевой функции системы
5	3000	0,79
6	3000	0,77
7	3000	0,75
8	3000	0,78
9	3000	0,81
10	3000	0,79

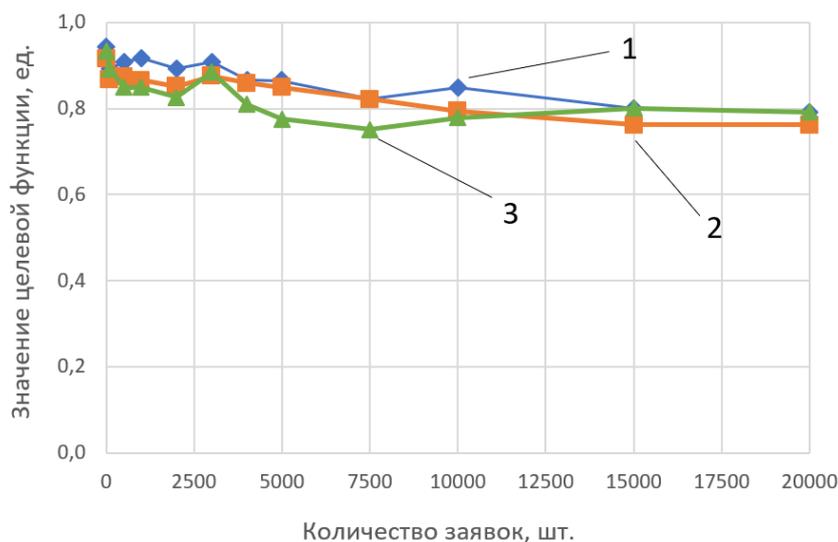
Из результатов эксперимента видно, что порядок прихода заявок не оказывает существенного влияния на результат планирования. Разброс между итоговыми значениями целевой функции системы составляет порядка 7%. Что говорит об устойчивом нахождении оптимума системой в данном эксперименте.

5.4 Исследование производительности

В данном исследовании оценивалась производительность представленного метода и его способность к адаптации расписания, поврежденного выходом из строя одного из МКА. В ходе экспериментов сначала выполнялось планирование заявок на съемку РИ, число которых в зависимости от эксперимента варьировалось от 100 до 20000, для различного количества МКА (15, 25, 35 единиц). При этом измерялось значение целевой функции системы (6) (Рисунок 5.2) и время, затраченное на составление плана (Рисунок 5.3). После окончания планирования из системы исключался один из МКА и измерялось время, затраченное на восстановление решения (Рисунок 5.4).

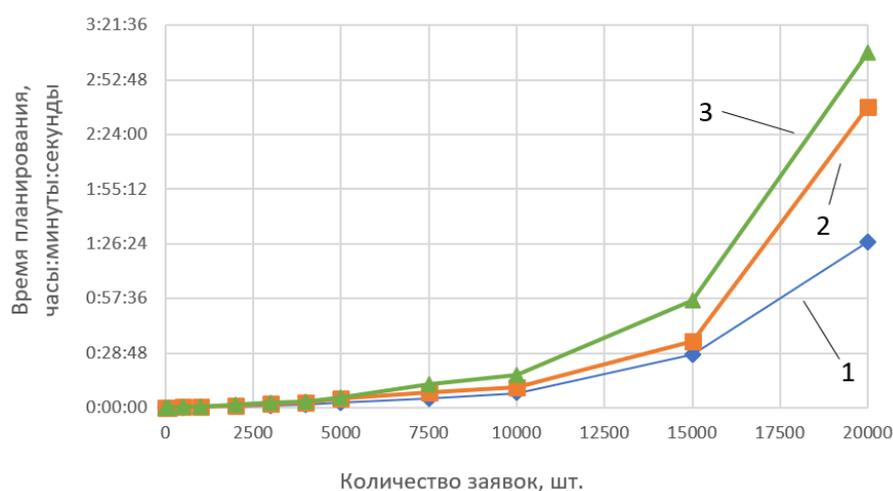
Результаты экспериментов показывают, что разработанный алгоритм удовлетворяет требованиям по производительности при работе с большими объемами заявок. При этом качество получаемого решения слабо зависит от числа МКА и заявок в системе. Время, затраченное на восстановление расписания, поврежденного выходом из строя одного из МКА, составляет значительно

меньшую долю от общего времени планирования и увеличивается пропорционально ему с ростом числа заявок и МКА в системе. Сравнение полученных результатов с результатами, представленными в работах [42, 43, 62], показывает, что разработанный алгоритм демонстрирует более высокую производительность и масштабируемость, позволяя за аналогичный временной интервал обрабатывать значительно большее количество поступающих заявок (в 5-10 раз).



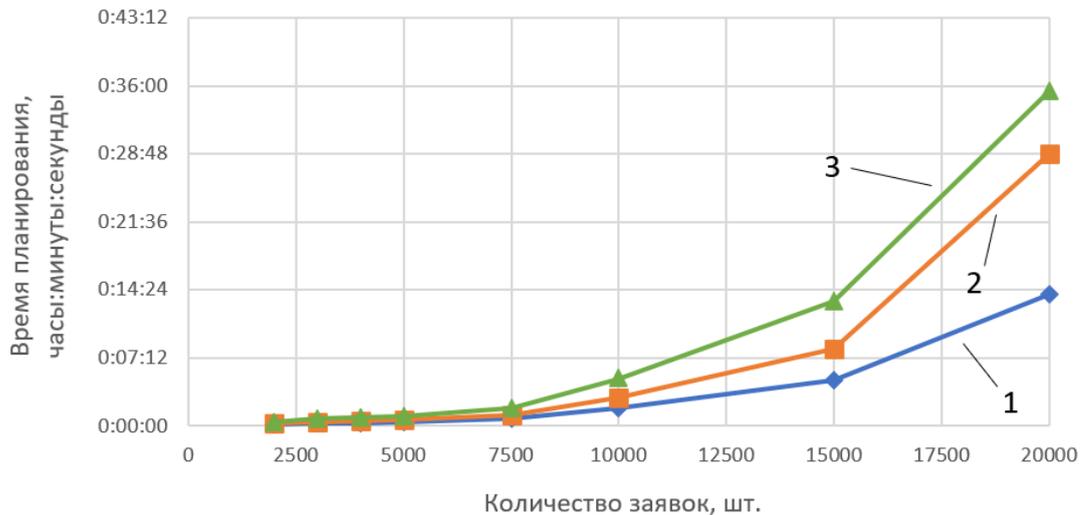
1) 15 МКА; 2) 25 МКА; 3) 35 МКА

Рисунок 5.2 – Графики зависимости значения целевой функции системы от количества заявок и МКА в системе



1) 15 МКА; 2) 25 МКА; 3) 35 МКА

Рисунок 5.3 – Графики зависимости времени планирования от количества заявок и МКА в системе



1) 15 МКА; 2) 25 МКА; 3) 35 МКА

Рисунок 5.4 – Графики зависимости времени восстановления расписания от количества заявок и МКА в системе

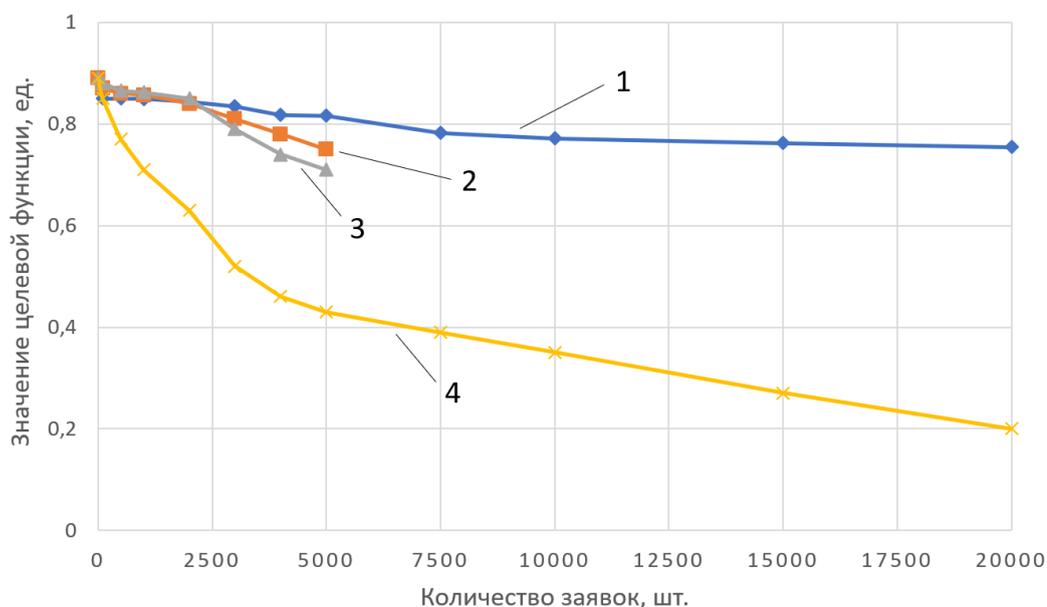
5.5 Анализ эффективности в сравнении с известными методами планирования

В данном исследовании проводилось сравнение разработанного метода с известными методами планирования, основанными на эвристических методах оптимизации (алгоритм имитации отжига, поиск восхождением к вершине, поиск с запретами). При этом измерялось время, затраченное на составление плана, и качество полученного решения (значение ЦФ системы (6)).

Для реализации экспериментов использовался открытый Java-фреймворк Optaplanner (компании Red Hat) [47], что потребовало подготовки данных, настройки алгоритмов и анализа и сопоставления получаемых результатов.

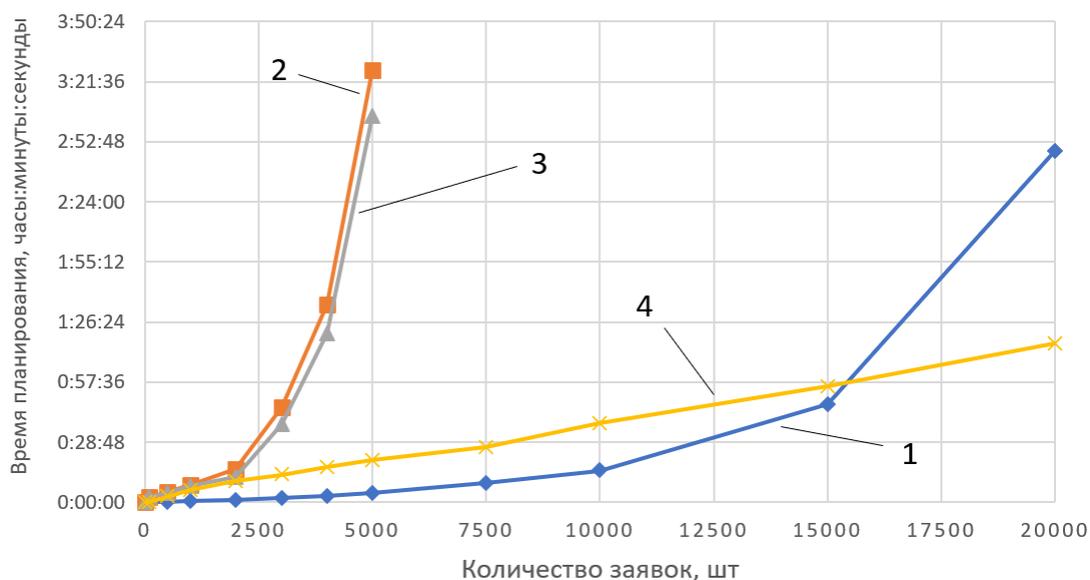
В ходе исследования моделировался случайный поток заявок на съемку РИ, распределенных по нормальному закону, количество которых изменялось от 100 до 20000. Горизонт планирования составлял от 1 дня до 14 дней (в зависимости от числа заявок).

На рисунках 5.5 и 5.6 соответственно представлены графики зависимости значения целевой функции системы (6) и времени планирования от количества заявок.



1) Мультиагентный метод; 2) Алгоритм имитации отжига; 3) Алгоритм поиска с запретами; 4) Алгоритм восхождения к вершине

Рисунок 5.5 – График зависимости значения ЦФ от количества заявок



1) Мультиагентный метод; 2) Алгоритм имитации отжига; 3) Алгоритм поиска с запретами; 4) Алгоритм восхождения к вершине

Рисунок 5.6 – График зависимости времени планирования от количества заявок

Результаты экспериментов показывают, что даже на задачах малой размерности предлагаемый мультиагентный метод не уступает традиционным эвристическим алгоритмам, а на большом количестве заявок (от 5000 до 20000) демонстрирует более высокую скорость построения расписания, где большинство других рассмотренных методов требуют больших временных затрат. Следует

отметить, что алгоритм восхождения к вершине показывает результат по скорости лучше предлагаемого метода, однако при этом значительно уступает в качестве построенного расписания.

Таким образом, разработанный метод позволяет обработать в 4 раза больше заявок в сравнении с известными методами. При этом качество получаемого решения повышается в среднем на 5% для выборок из 100 – 500 заявок и до 15% для выборки из 5000 заявок.

5.6 Выводы

В рамках шестой главы получены следующие основные результаты:

1. Предложена методика проведения экспериментальных исследований для оценки применимости разработанных методов и средств к решению задачи управления группировками МКА. В качестве основных исследований можно выделить: исследование качества решения, исследование адаптивности планирования по событиям, исследование производительности.

2. Проведенные экспериментальные исследования разработанного мультиагентного метода продемонстрировали возможность эффективного решения сложных задач планирования работы современных ОГ МКА ДЗЗ с учетом предъявляемых требований. В ходе адаптации расписания, поврежденного вышедшим из строя МКА, на другие МКА было перепланировано 98% от числа заявок, назначенных на удаленный МКА.

3. Результаты исследования адаптивности планирования по событиям показывают, что применение мультиагентных технологий для управления ресурсами ОГ МКА ДЗЗ позволяет парировать возникновение разрушающих событий, приводящих к изменению постановки решаемой задачи.

4. Для примера группировки в 25 КА общее время составления плана съемки для 20 тыс. РИ составило порядка 3 часов.

5. Результаты проведенных экспериментов по сравнению разработанного метода с известными методами планирования, основанными на эвристических методах оптимизации, демонстрируют превосходство предлагаемого метода по скорости получения решения при отработке большого числа заявок на съемку.

6 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В данной главе приводится описание разработки и внедрения разработанного сервиса согласованного планирования и прототипа платформы для решения задач управления группировками МКА «Канопус», которые решались по заказу компании АО «СТТ групп» в интересах АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Разработанный сервис позволил моделировать различные варианты конфигурации ОГ и планировать пакеты до 20 тысяч заказов на съемку на горизонте до 4 недель, включая объектовую и площадную съемку.

Разработанный сервис использовался также при разработке платформы управления пунктами приема информации и прошел испытания на площадке Сколковского института науки и технологий для планирования приема данных от МКА, запущенных при поддержке Фонда содействия инновациям в научно-технической сфере в августе 2022 года.

В Приложениях Б – Г представлены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [52, 57].

6.1 Проект разработки «Специализированное программное обеспечение информационной поддержки принятия решений по применению группировок космических аппаратов»

Данный проект проводился по заказу «Корпорация «ВНИИЭМ» в сотрудничестве с АО «СТТ групп». Основной задачей разрабатываемой системы являлось построение плана выполнения задач по съемке различных районов интереса группировкой КА ДЗЗ с целью поддержки принятия решений по функционированию космических систем ДЗЗ.

Перед разрабатываемым сервисом планирования предъявлялись следующие основные функциональные требования:

1. Составление плана (на интервале 1,5 – 10 суток) работы группировки КА и ППИ при заданном составе технических характеристик КС.

2. Составление локально-оптимального плана при автономном функционировании каждого КА в соответствии с его назначением и собственными критериями.

3. Составление плана при функционировании КА в составе сетевой группировки с динамическим распределением ресурсных возможностей каждого типа КА.

4. Корректировка плана при имитации возникновения непредвиденных событий.

5. Доработка плана с учетом требований пользователей по ручному назначению плана по съемке и передачи на ППИ.

6. Ввод и редактирование параметров группировки КА, ППИ и районов наблюдения;

7. Визуализация результатов планирования на картографической основе и в виде диаграмм, таблиц и графиков

8. Формирование отчетных документов по вопросам управления процессом планирования.

9. Выгрузки результатов планирования в файл.

Группировка КА, планирование работы которой было необходимо произвести, была представлена КА класса «Канопус». Число планируемых КА – 24 (запускаются по 4 КА, первоначально – 8 КА). Высота полета КА 300км. Полоса захвата – 15 км. Полоса обзора – 300 км. Витков в сутки – 70. В качестве критериев управления группировкой для поддержки принятия решений выступали оперативность, разрешение, стоимость.

РИ были представлены в виде точечных (20 на 20 км) и площадных. Общее количество РИ, которые система должна одновременно обрабатывать, составляет 20000. Необходимо иметь возможность планировать периодическую съемку и учитывать важность РИ по маршруту КА (от 0 до 1).

В начале выполнялось построенные плана на 10 суток, после чего построенный план актуализировался по событиям 2 раза в сутки, так же предусматривалось возможность более частого обновления плана.

Необходимо учитывать следующие события изменения плана:

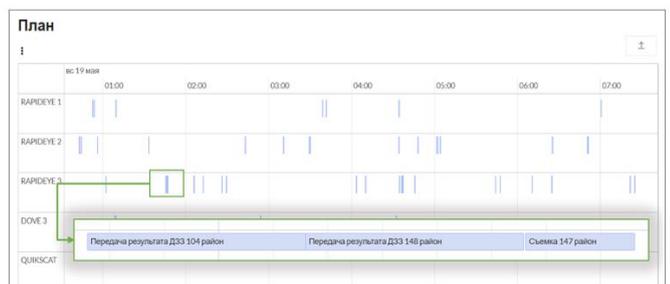
- Новый заказ или изменение его параметров.
- Выход из строя КА / Ввод в действие КА.
- Выход из строя канала связи / ввод в действие.
- Изменение приоритета РИ.

В результате разработки построен прототип сервиса планирования, архитектура и пользовательский интерфейс которого (Рисунок 6.1) были представлены ранее в данной работе.

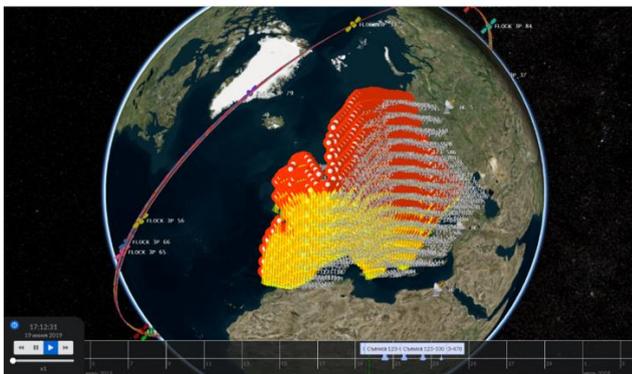
Данные для планирования

Наземные станции							
Добавить 30 + 1							
	Название	Скорость приема, Гб/сек	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	Угол раствора, град	
☐	HC 1	0.5	30	30	0	0	
☐	HC 2	0.5	-40	40	0	0	
☐	HC 5	0.5	40	40	0	0	
☐	HC 3	0.5	-40	-40	0	0	
☐	HC 4	0.5	-50	-50	0	0	

Результаты планирования



Физическая модель мира



Аналитическая информация

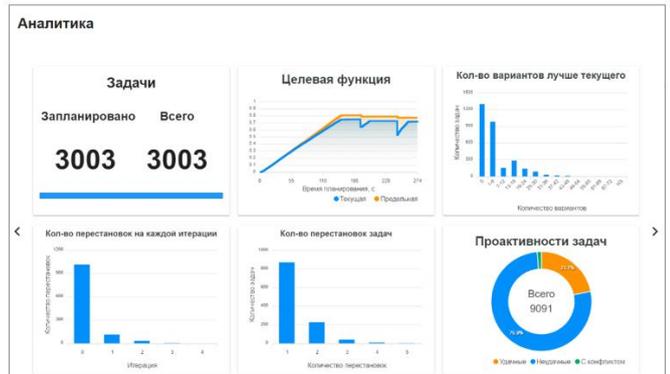
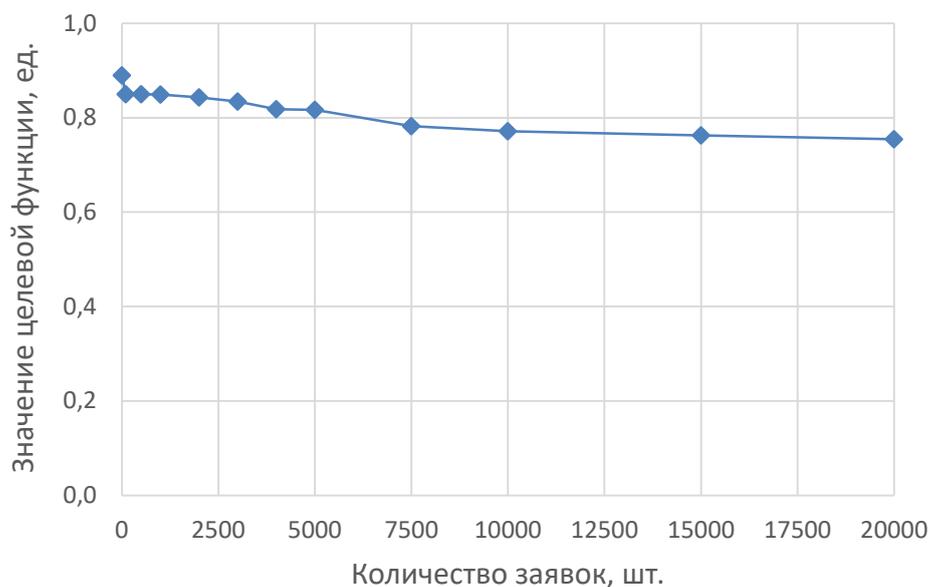


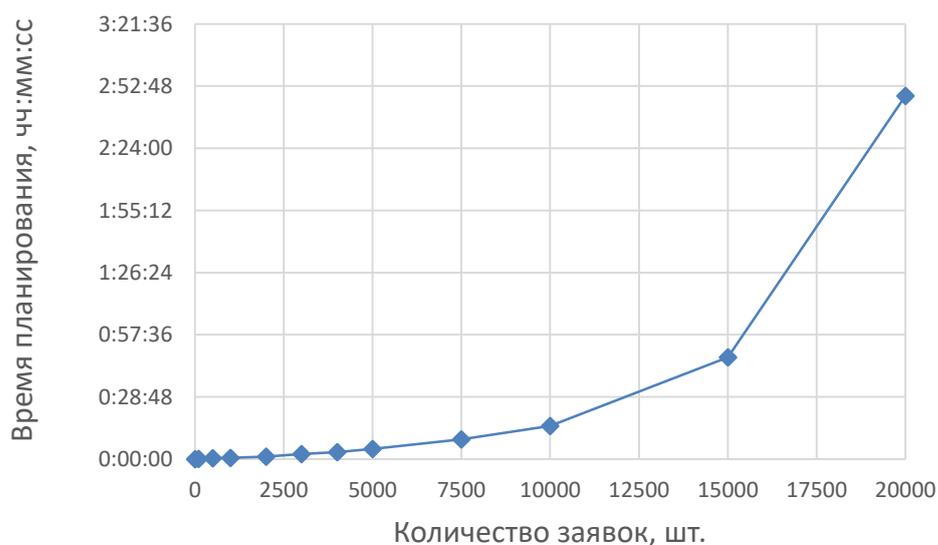
Рисунок 6.1 – Экраны СПО информационной поддержки принятия решений по применению группировок космических аппаратов

Для проверки применимости разработанной системы к решению задач управления группировками МКА в реальном времени была проведена серия экспериментов [55]. В ходе экспериментов сначала выполнялось планирование заявок на съемку РИ, число которых в зависимости от эксперимента варьировалось от 100 до 20000. При этом измерялось время, затраченное на составление плана (Рисунок 6.2а), и значение целевой функции системы системы (1) (Рисунок 6.2б). После окончания планирования в систему добавлялось еще 100 новых заявок на

съемку РИ и измерялось время, затраченное на их размещение в расписании. Результаты экспериментов представлены в таблице 6.1.



(а)



(б)

Рисунок 6.2 – Графики зависимости значения целевой функции системы (а) и времен планирования (б) от количества заявок

Результаты экспериментов показывают, что разработанная система продемонстрировала достаточно высокую производительность при работе с большими объемами заявок без серьезных потерь качества полученного решения. Время, затраченное на размещение новой партии заявок, хотя и увеличивалось с ростом числа уже имеющихся в системе заявок, но в среднем составило

значительно меньшую долю от общего времени планирования. Таким образом, применение мультиагентного подхода при планировании позволяет оперативно размещать в расписании новые заказы без его полного перестроения.

Таблица 6.1 – Результаты экспериментальных исследований системы

Номер эксперимента	Количество заявок	Время планирования	Значение ЦФ системы	Время размещения новой партии заявок
1	100	0:00:10	0,8498	0:00:11
2	500	0:00:20	0,8496	0:00:12
3	1000	0:00:37	0,8494	0:00:12
4	2000	0:01:11	0,8427	0:00:17
5	3000	0:02:17	0,8342	0:00:32
6	4000	0:03:09	0,8179	0:00:47
7	5000	0:04:40	0,8164	0:01:12
8	7500	0:09:09	0,7823	0:02:14
9	10000	0:15:16	0,7715	0:03:09
10	15000	0:47:12	0,7625	0:06:37
11	20000	2:48:20	0,7544	0:18:28

Полученные результаты анализировались экспертами, которые оценивали качество и эффективность предлагаемых планов в соответствии с разработанной методикой приема-сдаточных испытаний, которая была успешно выполнена.

В Приложении Д представлен акт внедрения результатов работы.

6.2 Проект разработки платформы совместного использования в ресурсных центрах распределенных наземных станций приема данных с космических аппаратов

Данный проект проводился при поддержке Фонда содействия инновациям (договор №371ГРНТИС5/42688) совместно со Сколковским институтом науки и технологий.

В проекте решались следующие научно-технические проблемы:

- Планирование заявок на проведение сеансов связи между космическими аппаратами и ППИ с учетом всех ограничений и адаптивным перепланированием при наступлении событий.

- Организация матчинга признаков заявок на проведение сеансов съемки и необходимых ресурсов.

- Расчет баллистики по взаимной видимости ППИ и КА.

- Организация авторизации и биллинга по факту выполнения заявок.

- Разработка протокола управления ППИ для организации процесса приема данных с КА.

Основными пользователями продукта являются коммерческие, образовательные и научно-исследовательские проекты. Продукт позволяет вышеуказанным пользователям размещать/продавать излишки времени по использованию ППИ. Данные пункты приема предполагается развернуть в рамках программы «Дежурный по планете» и привлечения школьников к космической деятельности. Качество услуг в контексте космической связи определяется принятым объемом данных относительного заказанного и доступностью ППИ.

Перед разрабатываемой системой предъявлялись следующие основные функциональные требования:

1. Осуществлять матчинг между поступающими заявками на передачу данных и характеристиками ППИ с целью подбора оптимального ресурса.

2. Планировать варианты выполнения задач по получению данных со спутников через ППИ с учетом всех ограничений

3. Делать перестройку плана при возникновении событий: добавление нового ППИ, изменение доступности ППИ, отказ владельца станции от выполнения заявки и т.д.

4. Предоставлять владельцу ППИ список запланированные задачи по передаче данных

5. Оповещать владельцев ППИ о новых поступивших заявках.

6. Предоставлять владельцу ППИ возможность принимать или отклонять запланированной задачи.

7. Управлять ППИ для автоматизированного приема данных с космических аппаратов.

8. Планирование не менее чем для 30 ППИ.

9. Планирование не менее чем 1000 заявок на получение данных со спутника.

10. Поддержка регистрации для не менее 1000 пользователей.

11. Поддержка не менее двух типов ППИ УКВ и X-диапазона.

12. Планирование на горизонт времени не менее 8 суток.

13. Расчет видимостей с ППИ на горизонте до 8 суток не менее чем с 10 спутниками.

В результате разработки программно реализована общая архитектура приложения (Рисунок 6.2) и алгоритмы планирования заявок на проведение сеансов связи между космическими аппаратами и ППИ с учетом всех ограничений и адаптивным перепланированием при наступлении событий.

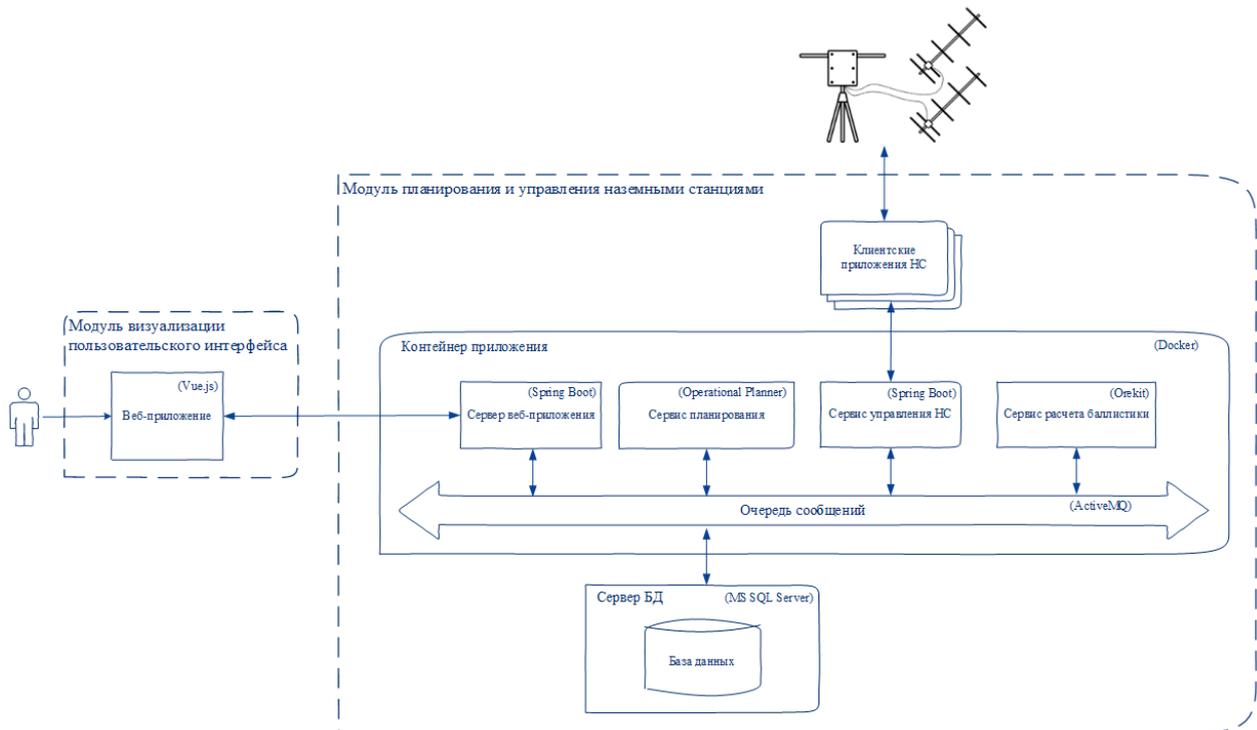


Рисунок 6.2 – Архитектура платформы

Сценарий использования. После авторизации пользователь попадает на страницу личного кабинета. В левой части экрана расположено навигационное меню, кнопка перехода к справке по работе с системой, профиль пользователя и

кнопка выхода из системы.

В пункте навигационного меню «Наземные станции» пользователь может посмотреть список доступных для проведения сеанса связи ППИ, включая ППИ других пользователей (Рисунок 6.3).

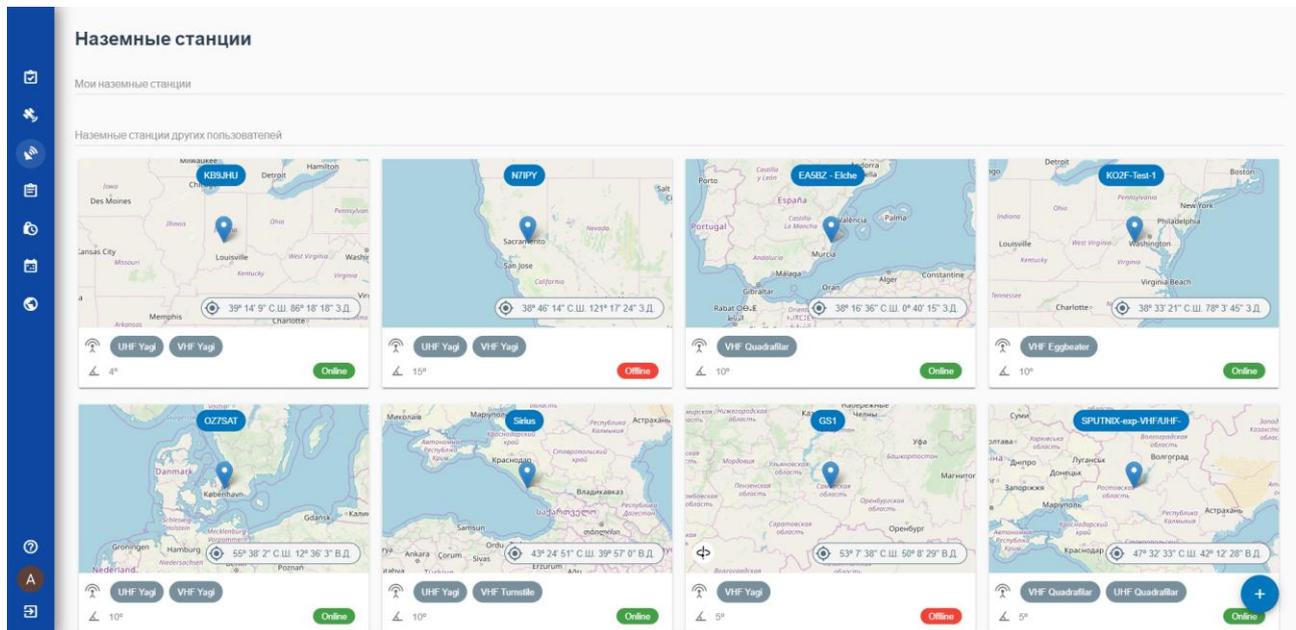


Рисунок 6.3 – Экран «Наземные станции»

ППИ может находится либо во включенном состоянии (online), либо в выключенном (offline). Если ППИ выключен, то при наведении на ее статус будет отображаться сообщение о времени последней активности. При наличии поворотного устройства (ротатора) на карточке будет отображаться соответствующая иконка. Владельцу ППИ доступны функции редактирования и удаления ППИ.

В пункте навигационного меню «Спутники» пользователь может посмотреть список доступных для проведения сеанса связи космических аппаратов (рисунок 6.4).

Для добавления ППИ необходимо выбрать пункт навигационного меню «Наземные станции» и нажать на кнопку «+», расположенную в правом нижнем углу экрана. После этого откроется диалоговое окно добавления ППИ (рисунок 6.5), в котором необходимо заполнить соответствующие поля.

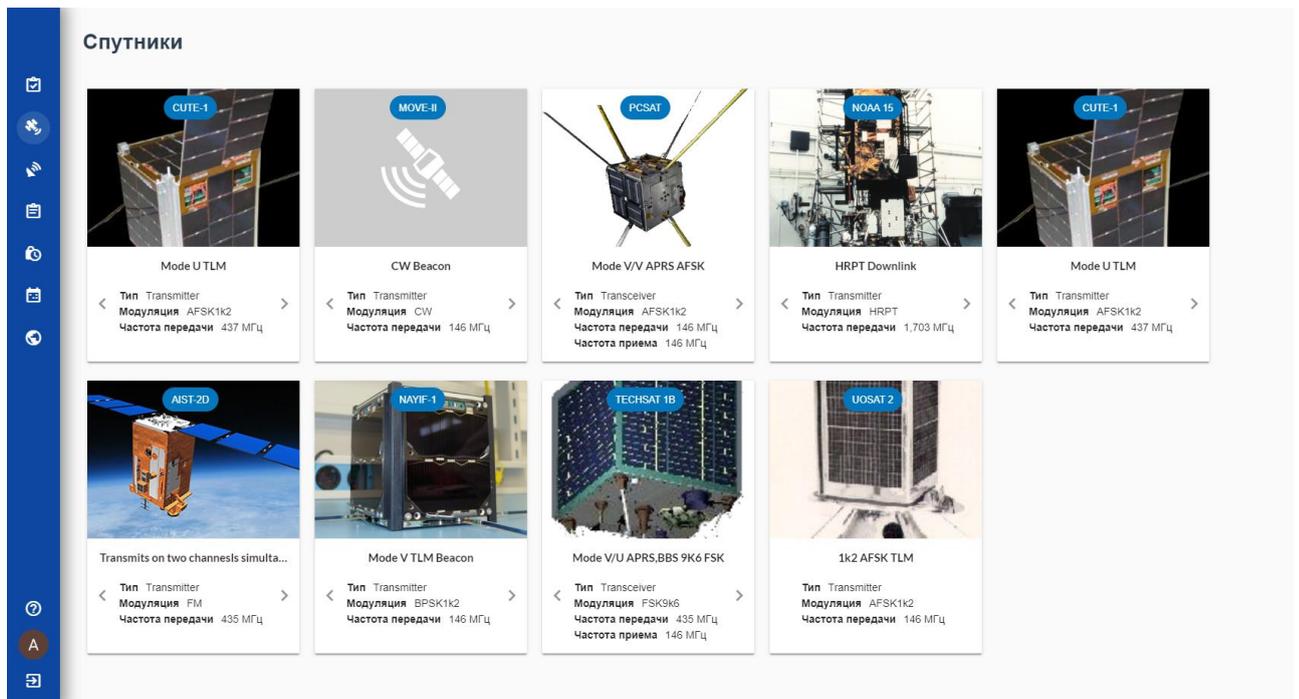


Рисунок 6.4 – Экран «Спутники»

Название

Описание

Широта, град

Долгота, град

Высота, м

0

Антенна

Минимальный угол возвышения, град

Имеет поворотный механизм

ОТМЕНА СОХРАНИТЬ

Рисунок 6.5 – Диалоговое окно добавления ППИ

После добавления ППИ на его карточке появится сигнализирующая иконка о необходимости настройки клиентского обеспечения, при нажатии на которую

откроется страница с инструкцией. Необходимый для настройки ID ППИ можно узнать путем наведения на иконку «Информация», расположенной в нижней части карточки.

Для редактирования необходимо нажать на соответствующую иконку и изменить параметры ППИ в открывшемся окне.

В пункте навигационного меню «Заявки» отображается список созданных пользователем заявок на проведение сеанса связи (Рисунок 6.6). Для каждой заявки указывается ее номер, название ППИ и КА, между которыми должен состояться сеанс связи, трансмиттер, с которого будут приниматься данные, а также время проведения сеанса связи. Поле период будет заполнено, если планирование заявки осуществлялось автоматически.

Запланировать выполнение заявки можно двумя способами: автоматически и вручную. В первом случае для создания заявки нужно выбрать пункт навигационного меню «Заявки» и нажать на кнопку «+», расположенную в правом нижнем углу экрана. После этого откроется диалоговое окно (рисунок 6.7), в котором необходимо заполнить соответствующие поля.

Номер	Назначенная станция	Спутник	Состояние	Трансммиттер	Период	Время проведения сеанса	Результат	Действия
4e11d8bf	SPUTNIX-экp-VHF/UHF-	CUTE-1	Запланирована	Mode U TLM	18 июня 2019 13.54.00 —	18 июня 2019 18.11.34 —		
ce87954d	SPUTNIX-экp-VHF/UHF-	PCSAT	Выполнена	PEBSAT - 1k2 AFSK APRS	17 июня 2019 17.41.00 23 июня 2019 18.41.00	18 июня 2019 09.31.18 18 июня 2019 09.34.47	📶 ⬇️ ❌	
62c9588	OZTSAT	AIST-2D	Выполнена	Transmits on two channels simultano...	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	18 июня 2019 02.24.59 18 июня 2019 02.26.55	📶 ⬇️ ✓	
9b36cd0	KO2F-Test-1	NOAA 15	Не выполнена	APT Downlink	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	17 июня 2019 16.43.49 17 июня 2019 16.47.07		
7e179ca1	SPUTNIX-экp-VHF/UHF-	TECHSAT 1B	Выполнена	Mode VU BBS1 9K6 FSK	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	18 июня 2019 14.00.19 18 июня 2019 14.03.45	📶 ⬇️ 🟢 🚫	
b45b4b8b	SPUTNIX-экp-VHF/UHF-	MOVE-II	Выполнена	BPSK Telemetry	17 июня 2019 15.25.00 —	17 июня 2019 23.23.51 —	📶 ⬇️ ✓	
e6b69dc4	KB9JHU	AIST-2D	Выполнена	Transmits on two channels simultano...	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	17 июня 2019 19.47.22 17 июня 2019 19.49.12	📶 ⬇️ ✓	
9b3d703e	KB9JHU	NOAA 15	Выполнена	Beacon 1	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	17 июня 2019 16.44.39 17 июня 2019 16.46.44	📶 ⬇️ ✓	
60893f11	GS1	PCSAT	Не выполнена	Mode VIV APRS AFSK	17 июня 2019 15.25.00 23 июня 2019 16.25.00	17 июня 2019 17.03.13 17 июня 2019 17.06.43		
720688d1	SPUTNIX-экp-VHF/UHF-	AIST-2D	Выполнена	Transmits on two channels simultano...	10 июня 2019 13.59.00 —	10 июня 2019 00.47.39 12 июня 2019 00.53.22	📶 ⬇️ 🟢 🚫	+

Рисунок 6.6 – Экран «Заявки»

Новая заявка

Спутник

Период проведения сеанса

Мин. продолжительность сеанса связи, с
10

Мин. угол возвышения, град
45

Приоритет

ОТМЕНА СОХРАНИТЬ

Рисунок 6.7 – Диалоговое окно создания заявки на сеанс связи

Пользователь должен выбрать из списка спутник, с которым необходимо провести сеанс связи, после чего указать один из его трансмиттеров, период проведения и минимальную продолжительность сеанса связи, а также минимальный угол возвышения спутника над горизонтом. При таком способе создания заявки будет проведено автоматическое планирование, при котором используется два критерия: скорость и качество. Поэтому при создании заявки также нужно указать приоритет каждого из критериев с помощью передвижения ползунка. Чем ближе к левому краю, тем быстрее будет выполнена заявка, но при этом не гарантировано высокое качество полученных данных. Чем ближе к правому краю, тем выше будет качество полученных данных, но при этом заявка может быть запланирована в конце указанного периода. После заполнения всех полей необходимо нажать на кнопку «Сохранить», новая заявка со статусом «Создана» появится в списке. Если системе удастся запланировать заявку, она перейдет в состояние «Запланирована» и будет уточнено время проведения сеанса, иначе в состояние «Не выполняма».

Разработанная система прошла испытания на площадке Сколковского института науки и технологий по разработанной программе и методике испытаний

и в настоящее применяется для взаимодействия с аппаратами, запущенными в августе 2022 года.

В Приложении Ж представлен акт внедрения результатов работы.

6.3 Выводы

В рамках пятой главы получены следующие основные результаты:

1. Разработанный прототип цифровой платформы для управления группировкой МКА прошел апробацию в ряде организаций и показал перспективность для использования не только для наземных систем управления группировками МКА, но и для бортовых систем.

2. Разработанный сервис согласованного планирования был внедрен в «Корпорация «ВНИИЭМ» для планирования большого числа заявок, показав требуемое качество и эффективность решения в задачах планирования съемки ДЗЗ до 20 тысяч заявок.

3. Разработанная цифровая платформа используется также в Сколковском институте науки и технологий для планирования приема данных от МКА, запущенных при поддержке Фонда содействия инновациям в научно-технической сфере в августе 2022 года.

4. В ходе проведенных работ разработанные методы и средства прошли практическую апробацию и введены в промышленную эксплуатацию, обеспечивая требуемую оперативность, гибкость и эффективность решения поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Проведен системный анализ предметной области управления ресурсами ОГ МКА ДЗЗ и сформулированы требования к сервису планирования цифровой платформы управления группировками МКА.

2. Сформулирована новая задача согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления ОГ МКА ДЗЗ.

3. Разработан метод согласованного планирования больших пакетов заявок (десятки тысяч) на объектовую и площадную съемку ОГ МКА ДЗЗ посредством выявления и разрешения конфликтов по совместному использованию разделяемых ресурсов аппаратов и пунктов приема информации, реализованный в виде сервиса.

4. Разработана функциональная архитектура цифровой платформы на основе сервиса согласованного планирования группировок МКА ДЗЗ, обеспечивающая полный комплекс услуг для потребителей, включая задание параметров МКА, ввод заявок на съемку РИ, согласованное планирование заявок, МКА и ППИ, и предоставление результатов потребителям.

5. Проведено исследование разработанных методов и средств в сравнении с известными методами для отработки большого числа заявок на съемку в ОГ ДЗЗ для 30 МКА (до 20 тысяч заявок), показывающее возможность увеличения объема обрабатываемых пакетов заявок в 4 раза и повышения качества получаемых изображений на 5-15% в зависимости от размера выборки.

6. Разработанные методы и средства были использованы для решения задач управления группировками МКА «Канопус» в рамках цифровой платформы, создаваемой АО «СТТ групп» в интересах АО «Корпорация «ВНИИЭМ», а также для моделирования работы группировок аппаратов РКЦ «Прогресс» и Сколковского института науки и технологий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

КА – космический аппарат

МКА – малый космический аппарат

ППИ – пункт приема информации

РИ – район интереса

ОГ ДЗЗ – орбитальная группировка ДЗЗ

БД – база данных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аншаков Г.П. Методы устранения конфликтов между режимами функционирования КА ИПРЗ при составлении программ работы/ Г.П. Аншаков, А.В. Соллогуб, Д.Г. Бундов // Исследование Земли из космоса. - 1988, № 3. - с.107-116.
2. Афанасьев И., Кучейко А. Один большой и 103 маленьких. Индия выполнила рекордный по числу полезных нагрузок запуск // Новости космонавтики. 2017. Т. 27, № 4. С. 30-36.
3. Балухто А. Н., Романов А. А. Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы развития //Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 65-75.
4. Барталев С.А., Жижин М.Н., Лупян Е.А., Матвеев М.Ю., Матвеев А.М., Медведев М.А., Савин И. Ю., Толпин В. А. Возможности исследований влияния изменения климата на состояние растительного покрова: концепция проекта CLIVT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 272–278
5. Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. - М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.
6. Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. № 2, 2009. С. 78-87.
7. Виттих, В.А. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах / В.А. Виттих, П.О. Скобелев // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 177-185.
8. Галузин В.А. Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем / В.А. Галузин, А.Ю. Кутоманов, М.М. Матюшин, П.О. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020;21(11): С. 639-650.
9. Галузин, В.А. Интеллектуальная система адаптивного планирования целевого применения перспективных космических систем дистанционного

зондирования Земли / П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, В.А. Галузин, А.В. Галицкая, В.С. Травин // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021): сб. тр. по материалам VII Междунар. конф. и молодеж. шк. (г. Самара, 20-24 сент.) - 2021. - Т. 2. - С. 022632

10. Галузин, В.А. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилев, В.Б. Ларюхин, Д.Е. Новичков, В.А. Галузин, Е.В. Симонова, И.В. Майоров, П.О. Скобелев // Автоматика и телемеханика, 2021, № 11, С. 30-67.

11. Галузин, В.А. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов / В.А. Галузин, Е.В. Симонова // Известия Самарского научного центра РАН, т. 20, № 6(2), 2018. С. 344-351.

12. Галузин, В.А. Подсистема планирования работы целевой аппаратуры группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при наблюдении обширных территорий / В.А. Галузин, Е.В. Симонова // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018) – С. 430-434.

13. Галузин, В.А. Разработка моделей, методов и средств создания цифровой платформы согласованного планирования целевого применения гетерогенных группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли / В.А. Галузин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. Т. 30. №1, С. 20-45.

14. Галузин, В.А. Разработка подхода к реализации и архитектуры интеллектуальной системы управления группировками малых космических аппаратов в реальном времени / П.О. Скобелев, В.А. Галузин, А.В. Галицкая, В.С. Травин // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2020)», Санкт-Петербург, 6–8 октября 2020 г. – С. 59-63.

15. Галузин, В.А. Семантическое распознавание сложных многофакторных образов опасных ситуаций в потоках данных / П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, В.С. Травин, А.А. Жилев, В.А. Галузин, А.В. Галицкая // 9-я конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)». — 2016. — С. 376

16. Гарбук, С.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли [Текст]/С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон – М. Издательство А и Б, 1997. – 296 с., ил.
17. Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К. Состояние и перспективы развития космических комплексов "Канопус-В" и "Метеор-М" //Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. Т.2. №.4, 2015. С. 14-19.
18. Городецкий В.И. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения / В.И. Городецкий, О.В. Карсаев //Известия Южного федерального университета. Технические науки, № 2 (187), 2017, с. 234-247.
19. Дарнопых В.В. Оптимальное планирование целевого функционирования низкоорбитальных космических систем связи и наблюдения: дис. канд. техн. наук:05.13.14/ В.В. Дарнопых. – Москва, 1999. – 214 с.
20. Дарнопых В.В. Параметрическая оптимизация квантили/ В.В. Дарнопых, К.А. Карп, В.В. Малышев, А.Ю. Смусев // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. - 1996, № 1. - с.99-106.
21. Дарнопых В.В. Применение единого методического подхода к оперативному планированию целевого функционирования спутниковых систем мониторинга связи/ В.В. Дарнопых // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 118-137.
22. Железняков А.Б. Космическая деятельность стран мира в 2020 году //Инновации. № 11, 2020. С. 2–8.
23. Карсаев О.В. Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов/ О.В. Карсаев // Труды СПИИРАН - 2016, 5(48), 151-181.
24. Кашеев А. А., Ларин С. А., Гусев С. И. Комплекс планирования и полётного контроля параметров съёмочной аппаратуры космических аппаратов серии «Ресурс-П». – 2021.
25. Куренков В. И. Методы исследования эффективности ракетно-космической техники [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие. URL:

<http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/Metody-issledovaniya-effektivnosti-raketnokosmicheskoi-tehniki-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54616/1/Куренков В.И. Методы исследования эффективности ракетно.pdf>

26. Кучейко А. Индийский пуск в интересах ДЗЗ и не только // Новости космонавтики. 2016. Т.26, № 11. С.57-58.
27. Лебедев А.А. Системный анализ и управление в аэрокосмической технике/ А.А. Лебедев, В.В. Малышев, К.А. Карп // - М.: МАИ, 1995. - 52 с
28. Лошкарев П. А., Заичко В. А. Основные принципы создания единой территориально-распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли из космоса //Сб. тез. Девятой открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. – 2011. – С. 14-18.
29. Лупян Е. А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю. С., Толпин В. А., Бурцев М. А. Развитие яровых культур на Европейской территории России и в южных регионах Западной Сибири в 2018 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 275–281.
30. Люгер, Д. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Д. Люгер. – М: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
31. Майоров И.В. Постановка задачи адаптивного планирования производственных ресурсов предприятий в мультиагентном подходе //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – №. 3. – С. 47-55.
32. Майоров И.В. Применение мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – №1. – С. 37–41
33. Майоров И.В., Скобелев П.О. Модель динамики агентов потребностей и возможностей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII Международной конференции (22-25 июня 2015, Самара, Россия) / Под ред. Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. – С.79-87.

34. Макриденко Л. А. и др. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114. – №. 1. – С. 15-26.
35. Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Фёдоров А.В. Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения её функциональных возможностей // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш 2017. № 2 (95). С. 37-45.
36. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход/Пер. с англ. и ред. КА Птицына. –2-е изд //М.: Вильямс. – 2006. – Т. 1408.
37. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царев А.В. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». 2010. №7 (28). С. 47-54.
38. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е. Модели сетцентрических задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2012. №1(56). С. 34-38.
39. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жилияев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. №1(62). С. 16-26.
40. Ханцеверов Ф.Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли/ Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов // - М.: Машиностроение, 1989. - 264 с.

41. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы [Текст]: Чандра А.М., Гош С.К. / Пер. с англ. А.В. Кирюшина. – Москва: Техносфера. 2008. – 312с., ил.
42. Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A. Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // *Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites*. 2015. №104. P. 118-130. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.103.
43. Bonnet J. Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System/ J. Bonnet, M. Gleizes, E. Kaddoum, S. Rainjonneau, G. Flandin, // In *Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15)*. IEEE Computer Society, USA, P. 11–20.
44. Bunkheila F. A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations/ F. Bunkheila, E. Ortore, C. Circi // *Acta Astronautica*. – 2016. – Volume 123, P. 121-128.
45. Chu, X., Chen, Y., Tan, Y., 2017. An anytime branch and bound algorithm for agile Earth observation satellite onboard scheduling. *Advances in Space Research*. Vol. 60, No. 9, P. 2077-2090.
46. Davis, G. F., & Sinha, A. (2021). Varieties of Uberization: How technology and institutions change the organization(s) of late capitalism. *Organization Theory*, 2(1), 263178772199519
47. De Smet G. et al. *Optaplanner user guide*. Red Hat and the community. 2016.
48. Du Y., Wang T., Xin B., Wang L., Chen Y., Xing L. A data-driven parallel scheduling approach for multiple agile Earth observation satellites, *IEEE Trans. Evol. Comput*, vol. 24, 2020. pp. 679 – 693
49. Flexplan [Электронный ресурс] – URL: <https://www.gmv.com/en/Products/flexplan/> (дата обращения 07.04.2022)
50. Galuzin, V. Adaptive planning method for operations of a multi-satellite swarm for Earth remote sensing in real time / P. Skobelev, E. Simonova, V. Galuzin, A. Galitskaya, V. Travin // *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2021)*, Online, 04-06 February, 2021, vol. 1. – SCITEPRESS. – P. 48-57.

51. Galuzin, V. Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. / V. Galuzin, A. Galitskaya, S. Grachev, V. Larukhin, D. Novichkov, P. Skobelev, A. Zhilyaev // *Mathematics*, 2022, 10, P. 1-27
52. Galuzin, V. Design of an autonomous distributed multi-agent mission control system for a swarm of satellites / P. Skobelev, G. Myatov, V. Galuzin, A. Galitskaya, A. Ivanov, A. Chernyavskii // *ICAART 2022*, February 3-5, 2022
53. Galuzin, V. Determining Inhomogeneity Areas in Agricultural Fields Based on the Earth Remote Sensing Images / P. Skobelev, V. Travin, E. Simonova, V. Galuzin, A. Galitskaya // *Conference of Open Innovation Association, FRUCT. - 2019. - P. 272-278*
54. Galuzin, V. Intelligent System for Adaptive Planning of Targeted Application of Advanced Space Systems for Earth Remote Sensing / V. Galuzin // *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2021, P. 1-5
55. Galuzin, V. Intelligent system for real-time adaptive management of groups of small satellites: design and experimenting / P. Skobelev, V. Galuzin, A. Galitskaya, V. Travin // *Journal of Physics Conference Series*, 1864(1):012085, 2021
56. Galuzin, V. Multi-agent Planning System for Target Application of Earth Remote Sensing Space Systems for Solving Precision Farming Tasks / P. Skobelev, V. Travin, E. Simonova, D. Mishutin, V. Galuzin, A. Galitskaya // *In Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2019) – Vol. 2*, P. 647-654.
57. Galuzin, V. Swarm of Satellites: Implementation and Experimental Study of Multi-Agent Solution for Adaptive Scheduling of Large-Scale Space Observation Systems / P. Skobelev, E. Simonova, V. Galuzin, A. Galitskaya, V. Travin // *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Social Good. The PAAMS Collection. PAAMS 2021. Lecture Notes in Computer Science*, vol 12946. Springer, Cham. P. 267-278
58. Galuzin, V. Technology development for detecting inhomogeneities in agricultural fields / P. Skobelev, V. Travin, E. Simonova, V. Galuzin, A. Galitskaya // *International*

Journal of Engineering and Advanced Technology 2019. — Vol. 9. Issue 1.
— P. 3802-3808

59. Gorelov Y.N., Danilov S.B., Kurganskaya L.V. etc. Optimization of multiroute scanning of geometrically complex sensing zones for spacecraft with optoelectronic observation equipment // 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018 - Proceedings. — 2018. — P. 1-4
60. Gutierrez F. Pro Spring Boot 2: An Authoritative Guide to Building Microservices, Web and Enterprise Applications, and Best Practices. Apress, 2019. p. 511
61. He L., Liu X., Xing L., Liu K. Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment // Advances in Space Research. 2019. Vol. 63, Iss. 2. P. 897-912. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.007.
62. He, L., Liu, X., Laporte, G., Chen, Y., et al.: An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling. Computers & Operations Research, vol. 100, pp 12-25 (2018)
63. Herz E. EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning/ E. Herz // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. P. 1728-1738
64. Iacopino C. How ants can manage your satellites/ C. Iacopino, P.L. Palmer, N. Policella, A. Donati, A. Brewer// Acta Futura. – 2014. – 9, P. 59-70.
65. Karapetyan D. Satellite downlink scheduling problem: A case study/D. Karapetyan, S. Minic, K.T. Malladi, A. Punnen// Omega. – 2015. – Volume 53, P. 115-123
66. Kim H., Chang Y. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 40. P. 17-32. DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006.
67. Kopacz J., Herschitz R., Roney J. Small Satellites an Overview and Assessment. Acta Astronautica. Vol. 170, 2020. pp. 93-105
68. Lenzen C. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission/ C. Lenzen et al.// Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. – 2014, P. 517-527

69. Luo K., Wang H., Li Y., Li Q. High-performance technique for satellite range scheduling // *Computers & Operations Research*. 2017. Vol. 85. P. 12-21. DOI: 10.1016/j.cor.2017.03.012.
70. Macrae C. *Vue.js: up and running: building accessible and performant web apps*. O'Reilly Media, Inc., 2018.
71. Maocai Wang, Guangming Dai, and Massimiliano Vasile, "Heuristic Scheduling Algorithm Oriented Dynamic Tasks for Imaging Satellites," Hindawi Publishing Corporation, 2014.
72. Niu X., *Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm/* X. Niu, H. Tang, L. Wu// *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2018. Volume 28, P. 813-825
73. Orbit Logic CPAW, Collection Planning and Analysis Workstation [Электронный ресурс] – URL: <http://www.orbitlogic.com/collection-planning-and-analysis-workstation.html> (дата обращения 07.04.2022)
74. Orekit [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.orekit.org/>. (дата обращения 08.07.2022)
75. P. Courmontagne, «An improvement of ship wake detection based on the radon transform», *Signal Processing*, т. 85, № 8, pp. 1634-1654, 2005
76. Peng S., Chen H., Du C., Li J., Jing N. Onboard observation task planning for an autonomous Earth observation satellite using long shortterm memory, *IEEE Access*, vol. 6, 2018. pp. 65118-65129
77. Phillips S., Parra F. A Case Study on Auction-Based Task Allocation Algorithms in Multi-Satellite Systems. AIAA 2021-0185. AIAA Scitech 2021 Forum. p. 0185
78. SaVoir [Электронный ресурс] – URL: <https://www.taitussoftware.com/products/applications/savoir> (дата обращения 07.04.2022)
79. Schmidt M., Schilling K. A scheduling system with redundant scheduling capabilities // *Proceedings of the 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space*. – 2009.

80. Schmidt M., Schilling K. Enhanced redundant scheduling capability for low cost ground station networks //Proc. of IWSS-11. – 2011.
81. Schönig H. J. Mastering PostgreSQL 13: Build, administer, and maintain database applications efficiently with PostgreSQL 13. – Packt Publishing Ltd, 2020.
82. Schilling K. Networked distributed pico-satellite systems for earth observation and telecommunication applications. – 2011.
83. Shimoda H. Remote Sensing Data Applications. In Handbook of Satellite Applications. 2016. pp. 1-70.
84. Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V. Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing // In: Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., McFarlane D. (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence. 2016. Vol. 640. P. 309-317. DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_28.
85. Skobelev P.O., Lakhin O.I. Towards the digital platform and smart services for managing space traffic // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. 2018. Vol. 13, № 2. P. 187-198. DOI: 10.2495/DNE-V13-N2-187-198.
86. Software applications for mission planning [Электронный ресурс] – URL: https://www.dlr.de/rb/en/desktopdefault.aspx/tabid-6816/4256_read-6303/ (дата обращения 07.04.2022)
87. Song, Y., Huang, D., Zhou, Z., Chen, Y., 2018. An emergency task autonomous planning method of agile imaging satellite. EURASIP J.Image Video Process. No. 29, P. 1-11.
88. Song Y., Zhou Z., Zhang Z., Yao F., Chen Y. A framework involving mec: imaging satellites mission planning, Neural Comput. Appl. vol 32, issue 19, 2019. pp 15329-15340.
89. Tangpattanakul P., Jozefowicz N., Lopez P. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite // European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 245. P. 542-554. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011.

90. Tonetti, S., Cornara, S., Heritier, A., Pirondini, F., 2015. Fully automated mission planning and capacity analysis tool for the DEIMOS-2 agile satellite. In Proc. Workshop Simul. Eur. Space Program. No. 1760, P. 1-15.
91. Valckenaers, P. MAS coordination and control based on stigmergy / P. Valckenaers, Hadeli, B. Saint Germain, P. Verstraete, H. Van Brussel // Computers in Industry. – 2007. – Vol. 58(7). – P. 621-629.
92. Wang J. A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds / J. Wang, E. Demeulemeester, D. Qiu// Computers & Operations Research. – 2016. – Volume 74, P. 1-13.
93. Wang J. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites/ J. Wang, Z. Jianjiang, Y. Xiaomin, Z. Laurence, M. Jianghan // Journal of Computer and System Sciences. – 2015. – Volume 81, Issue 1, P. 110-124
94. Wang X., Wu G., Xing L., Pedrycz W. Agile Earth Observation Satellite Scheduling Over 20 Years: Formulations, Methods, and Future Directions. IEEE Systems Journal, 2020. pp. 1-12.
95. Xiaolu L. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time/ L. Xiaolu, G. Laporte, Y. Chen, R. He// Computers & Operations Research. – 2017. – Volume 86, P. 41-53.
96. Zhang Z. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem/ Z. Zhang, F. Hu, N. Zhang. // Applied Intelligence. – 2018. – Volume 48, Issue 10, P. 3295–3305.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЛИСТИНГ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ

```

package ru.ss.satremotesens.planner.domain.planningphase.proactiv.agent;
import com.google.common.collect.ArrayListMultimap;
-----//-----
import java.util.stream.Stream;
import static java.util.stream.Collectors.toCollection;
@Slf4j
@EqualsAndHashCode(of = "taskId")
//Класс агента заявки на съемку РИ
public class PointObjectForShootingTaskAgent {
    public static final Random RANDOM = new Random();
    @Getter
    private final Long taskId;
    private final Schedule schedule;
    private final ProactivePlanningContext context;
    public static final double MIN_OBJECTIVE_FUNCTION_DELTA = 1e-3;
    public PointObjectForShootingTaskAgent(Long taskId, ProactivePlanningContext context) {
        this.taskId = taskId;
        this.schedule = context.getSchedule();
        this.context = context;
    }
//Метод активности агента
    public Optional<AgentProactiveResult> proactive() {
        context.markAgentAsActive(this);
        List<Move> plannedMoves = new ArrayList<>();
        for (PermutationOptionGenerator i = new PermutationOptionGenerator(); isActive() &&
i.hasNext(); ) {
            PermutationOption permutationOption = i.next();
            List<Move> moves = permutationOption.getMoves();
            ApplyMovesResult applyMovesResult = context.applyMoves(moves);
            if (applyMovesResult.isSuccessful()) {
                log.info(permutationOption.toString());
                plannedMoves = moves;
                break;
            }
        }
        if (!isActive()) return Optional.empty();
        context.markAgentAsPassive(this);
        return Optional.of(new
AgentProactiveResult(Collections.unmodifiableList(plannedMoves)));
    }
// Метод остановки агента
    public void stop() {
        if (!isActive()) throw new IllegalStateException();
        context.markAgentAsPassive(this);
    }

```

```

public boolean isActive() {
    return context.isAgentActive(this);
}

```

//Метод поиска интервала передачи данных на ППИ

```

private FindDropIntervalResult findDropInterval(ShootingWorkOption shootingWorkOption,
                                                Collection<DropIntervalOption>
dropIntervalOptions, Collection<Conflict> shootingConflicts,
                                                List<Move> moves, double
maximumCompensation,
                                                AvailabilityConstraintValidator
availabilityConstraintValidator) throws ScheduleChangedException {
    Multimap<List<Double>, DropIntervalOption> groupedByTaskPriorityDropIntervalOptions
=
        dropIntervalOptions.stream().collect(MultimapCollector.toMultimap(
            d -> d.getConflicts().stream().map(Conflict::getConflictTaskId)
                .map(context::getTaskAgent)
                .map(PointObjectForShootingTaskAgent::getPriority)
                .sorted((d1, d2) -> Double.compare(d2,
d1)).collect(Collectors.toList()),
            d -> d));
    List<List<Double>> sortedPrioritiesList =
groupedByTaskPriorityDropIntervalOptions.keySet()
        .stream().sorted((priorityList1, priorityList2) -> {
            int n = Math.min(priorityList1.size(), priorityList2.size());
            for (int i = 0; i < n; i++) {
                int compare = Double.compare(priorityList1.get(i),
priorityList2.get(i));
                if (compare != 0)
                    return compare;
            }
            return Integer.compare(priorityList1.size(), priorityList2.size());
        }).collect(Collectors.toList());
    for (List<Double> priorities : sortedPrioritiesList) {
        Map<ResolveConflictsResult, TimePeriod> resolveConflictsResults = new
HashMap<>();
        for (DropIntervalOption dropIntervalOption :
groupedByTaskPriorityDropIntervalOptions.get(priorities)) {
            Multimap<Long, Conflict> taskConflictMultimap =
groupConflictsByTask(Stream.concat(dropIntervalOption.getConflicts().stream(),
shootingConflicts.stream()).collect(Collectors.toList()));
            AvailabilityConstraintValidator validator = new
AvailabilityConstraintValidator(availabilityConstraintValidator);
            validator.addConstraint(new
AvailabilityConstraint(RandomUtil.randomLong(RANDOM),
                new ResourceRef(shootingWorkOption.getGroundStationId(),
ResourceRef.ResourceType.GroundStation), dropIntervalOption.getDropInterval()));

```

```

        validator.addConstraint(new
AvailabilityConstraint(RandomUtil.randomLong(RANDOM),
        new ResourceRef(shootingWorkOption.getSatelliteId(),
ResourceRef.ResourceType.Satellite), dropIntervalOption.getDropInterval()));
        resolveConflictsResults.put(resolveConflicts(taskConflictMultimap, moves,
maximumCompensation, validator), dropIntervalOption.getDropInterval());
    }
    ResolveConflictsResult bestResolveConflictsResult =
resolveConflictsResults.keySet().stream().filter(IMethodResult::isSuccessful)
        .min(Comparator.comparingDouble((ResolveConflictsResult r) ->
totalObjectiveFunctionDelta(r.getMoves()))).orElse(null);
    if (bestResolveConflictsResult != null)
        return new
FindDropIntervalResult(resolveConflictsResults.get(bestResolveConflictsResult),
bestResolveConflictsResult);
    }
    return new FindDropIntervalResult(null, null);
}

```

//Метод расчета значения функции удовлетворенности агента

```

public double satisfactionFunctionValue() {
    double currentEvaluation = schedule.getShootingWorkByTaskId(taskId)
        .map(ShootingWork::getShootingWorkOption)
        .map(ShootingWorkOption::getEvaluation).orElse(0.0);
    if (currentEvaluation == 0) return 0;
    IShootingWorkOptionProvider shootingWorkOptionProvider =
context.getShootingWorkOptionProviderFactory().getInstance(taskId);
    double bestEvaluation =
shootingWorkOptionProvider.getBestShootingWorkOptions().iterator().next().getEvaluation();
    assert bestEvaluation >= currentEvaluation;
    if (bestEvaluation - currentEvaluation <= MIN_OBJECTIVE_FUNCTION_DELTA) return 1;
    return currentEvaluation / bestEvaluation;
}

public boolean isSatisfied() {
    return (int) satisfactionFunctionValue() == 1;
}

```

//Метод поиска возможных интервалов передачи данных на ППИ

```

private Collection<DropIntervalOption> findDropIntervalOptions(TimePeriod
gsVisibleTimePeriod, List<Conflict> conflicts, long dropDuration) {
    List<DropIntervalOption> dropIntervalOptions = new ArrayList<>();
    IntervalTree<Long> conflictTree =
conflicts.stream().map(Conflict::getTimePeriod).map(CommonUtil::timePeriodToLongInterval)
        .collect(toCollection(IntervalTree::new));
    Multimap<LongInterval, Conflict> conflictMultimap = ArrayListMultimap.create();
    for (Conflict conflict : conflicts)

```

```

conflictMultimap.put(CommonUtil.timePeriodToLongInterval(conflict.getTimePeriod()),
conflict);
    long currentIntervalStart = gsVisibleTimePeriod.getStart();
    while (currentIntervalStart + dropDuration <= gsVisibleTimePeriod.getEnd()) {
        LongInterval currentInterval = new LongInterval(currentIntervalStart,
currentIntervalStart + dropDuration);
        Set<Conflict> conflictIntervals = conflictTree.query(currentInterval)
            .stream().map(i -> (LongInterval) i)
            .flatMap(i -> conflictMultimap.get(i).stream())
            .collect(Collectors.toSet());
        assert !conflictIntervals.isEmpty();
        Optional<Conflict> conflictWithHighPriorityTask =
            conflictIntervals.stream()
                .filter(conflict ->
context.getTaskAgent(conflict.getConflictTaskId()).getPriority() > this.getPriority())
                .max(Comparator.comparingLong((Conflict c) ->
c.getTimePeriod().getEnd()));
        if (conflictWithHighPriorityTask.isPresent()) {
            currentIntervalStart =
conflictWithHighPriorityTask.get().getTimePeriod().getEnd();
        } else {
            dropIntervalOptions.add(new
DropIntervalOption(longIntervalToTimePeriod(currentInterval), conflictIntervals));
            currentIntervalStart =
conflictIntervals.stream().map(Conflict::getTimePeriod).mapToLong(TimePeriod::getEnd).min()
                .orElse(currentInterval.getEnd());
        }
    }
    return dropIntervalOptions;
}

```

//Метод разбора конфликтов

```

private ResolveConflictsResult resolveConflicts(Multimap<Long, Conflict> conflicts,
List<Move> initMoves, double
maximumCompensation,
AvailabilityConstraintValidator
availabilityConstraintValidator) throws ScheduleChangedException {
    double currentObjectiveFunctionDelta = maximumCompensation;
    List<ShootingWork> conflictShootingWorks = conflicts.values().stream()
        .map(Conflict::getOperation).map(Operation::getShootingWork).distinct().collect(Collectors.
toList());
    List<Move> moves = new ArrayList<>(initMoves);
    for (ShootingWork conflictShootingWork : conflictShootingWorks) {
        assert moves.stream().noneMatch(move ->
move.getTaskId().equals(conflictShootingWork.getCompleteTaskId()) &&
move.getNextShootingWork() != null);
    }
}

```

```

        moves.stream().filter(move ->
move.getTaskId().equals(conflictShootingWork.getCompleteTaskId())).findFirst().ifPresent(mo
ves::remove);
        moves.add(createMove(conflictShootingWork.getCompleteTaskId(),
conflictShootingWork, null));
    }
    List<ResolveConflictResult> resolveConflictResults = new ArrayList<>();
    for (Long conflictTaskId : conflicts.keySet()) {
        Collection<Conflict> taskConflicts = conflicts.get(conflictTaskId);
        boolean isConflictTaskLowPriority =
context.getTaskAgent(conflictTaskId).getPriority() < this.getPriority();
        double maxCompensation = isConflictTaskLowPriority ? 1 :
currentObjectiveFunctionDelta;
        ResolveConflictResult resolveConflictResult = tryResolveConflict(taskConflicts,
moves, maxCompensation, availabilityConstraintValidator);
        if (resolveConflictResult.isSuccessful() &&
resolveConflictResult.getStatus().equals(ResolveConflictStatus.Resolved)) {
            Move resolveConflictMove = resolveConflictResult.getMove();
            if (!isConflictTaskLowPriority)
                currentObjectiveFunctionDelta +=
resolveConflictMove.objectiveFunctionDelta();
            if (resolveConflictMove.getNextShootingWork() != null) {
                moves.stream().filter(move ->
move.getTaskId().equals(resolveConflictMove.getTaskId())).findFirst().ifPresent(moves::remo
ve);
                moves.add(resolveConflictMove);
            }
        }
        resolveConflictResults.add(resolveConflictResult);
        if (!resolveConflictResult.isSuccessful()) break;
    }
    return new ResolveConflictsResult(resolveConflictResults);
}
private ResolveConflictResult tryResolveConflict(Collection<Conflict> conflicts,
List<Move> moves, double maxCompensation,
AvailabilityConstraintValidator
availabilityConstraintValidator) throws ScheduleChangedException {
    PointObjectForShootingTaskAgent taskAgent =
context.getTaskAgent(conflicts.iterator().next().getConflictTaskId());
    return taskAgent.resolveConflict(this, conflicts, moves, maxCompensation,
availabilityConstraintValidator);
}
public ResolveConflictResult resolveConflict(PointObjectForShootingTaskAgent agent,
Collection<Conflict> conflicts,
Collection<Move> moves, double
maxCompensation,

```

```

availabilityConstraintValidator) throws ScheduleChangedException {
    if (isActive() || this.getPriority() > agent.getPriority())
        return new ResolveConflictResult(conflicts, null,
ResolveConflictStatus.Unresolved);

    ShootingWork currentShootingWork =
this.schedule.getShootingWorkByTaskId(taskId).orElse(null);

    if (currentShootingWork == null) throw new ScheduleChangedException();

    ShootingWorkOption currentShootingOption =
currentShootingWork.getShootingWorkOption();

    for (Iterator<ShootingWorkOption> shootingWorkOptionIterator =
getWorseShootingOptions(currentShootingWork); shootingWorkOptionIterator.hasNext(); ) {
        ShootingWorkOption shootingWorkOption = shootingWorkOptionIterator.next();
        double objectiveFunctionDelta = currentShootingOption.getEvaluation() -
shootingWorkOption.getEvaluation();
        if (objectiveFunctionDelta >= maxCompensation) break;
        SatelliteOIVisible satelliteOIVisible =
shootingWorkOption.getSatelliteOIVisible();
        SatelliteGSVisible satelliteGSVisible =
shootingWorkOption.getSatelliteGSVisible();
        ResourceRef satelliteRef = new ResourceRef(satelliteOIVisible.getSatelliteId(),
ResourceRef.ResourceType.Satellite);
        ResourceUsePeriod satelliteUsePeriod = new ResourceUsePeriod(satelliteRef,
satelliteOIVisible.getVisiblePeriod());
        if (!availabilityConstraintValidator.checkAvailabilityConstraints(
            new ResourceUsePeriod(satelliteRef,
                new TimePeriod(satelliteOIVisible.getVisiblePeriod().getStart(),
satelliteGSVisible.getVisiblePeriod().getEnd()))).isSuccessful())
            continue;
        else {
            Set<Operation> satelliteOperations =
schedule.getSatelliteOperations(satelliteRef.getId(), satelliteUsePeriod.getTimePeriod());
            List<Operation> removedOperations =
moves.stream().map(Move::getPrevShootingWork).filter(Objects::nonNull)
                .filter(shootingWork ->
shootingWork.getSatelliteId().equals(satelliteRef.getId()))
                .flatMap(shootingWork -> Operation.of(shootingWork,
satelliteRef).stream())
                .filter(satelliteOperation ->
satelliteOperation.getResourceUsePeriod().getTimePeriod().overlaps(satelliteUsePeriod.getTi
mePeriod()))
                .collect(Collectors.toList());
            for (Operation removedOperation : removedOperations)

```

```

        if (!satelliteOperations.remove(removedOperation)) throw new
ScheduleChangedException();
        if (!satelliteOperations.isEmpty()) continue;
        List<Operation> addedOperations =
moves.stream().map(Move::getNextShootingWork).filter(Objects::nonNull)
        .filter(shootingWork ->
shootingWork.getSatelliteId().equals(satelliteRef.getId()))
        .flatMap(shootingWork -> Operation.of(shootingWork,
satelliteRef).stream())
        .filter(satelliteOperation ->
satelliteOperation.getResourceUsePeriod().getTimePeriod().overlaps(satelliteUsePeriod.getTi
mePeriod()))
        .collect(Collectors.toList());
        if (!addedOperations.isEmpty()) continue;
    }
    Optional<ShootingWork> shootingWorkOptional =
ShootingWorkMaker.makeShootingWork(shootingWorkOption, schedule,
availabilityConstraintValidator, moves);
    if (!shootingWorkOptional.isPresent()) continue;
    else {
        List<VolumeUseOperation> removedOperations =
moves.stream().map(Move::getPrevShootingWork).filter(Objects::nonNull)
        .filter(shootingWork ->
shootingWork.getSatelliteId().equals(satelliteRef.getId()))
        .map(VolumeUseOperation::of)
        .collect(Collectors.toList());
        List<VolumeUseOperation> addedOperations =
moves.stream().map(Move::getNextShootingWork).filter(Objects::nonNull)
        .filter(shootingWork ->
shootingWork.getSatelliteId().equals(satelliteRef.getId()))
        .map(VolumeUseOperation::of)
        .collect(Collectors.toList());
        if (schedule.findMemoryConflict(shootingWorkOptional.get(),
addedOperations, removedOperations, new HashSet<>()).isPresent())
            continue;
    }
    return new ResolveConflictResult(conflicts, createMove(this.taskId,
currentShootingWork, shootingWorkOptional.get()), ResolveConflictStatus.Resolved);
}
    if (currentShootingOption.getEvaluation() <= maxCompensation)
        return new ResolveConflictResult(conflicts, createMove(this.taskId,
currentShootingWork, null), ResolveConflictStatus.Resolved);
    return new ResolveConflictResult(conflicts, null,
ResolveConflictStatus.Unresolved);
}

```

//Метод разбора конфликтов по использованию ЗУ КА

```

public ResolveMemoryConflictResult resolveMemoryConflict(PointObjectForShootingTaskAgent
agent, VolumeUseOperation conflictOperation,
                                                    TimePeriod conflictPeriod,
double maxCompensation,
                                                    Collection<Move> moves,
AvailabilityConstraintValidator availabilityConstraintValidator) throws
ScheduleChangedException {
    ShootingWork currentShootingWork =
this.schedule.getShootingWorkByTaskId(taskId).orElse(null);
    if (currentShootingWork == null) throw new ScheduleChangedException();
    Long satelliteId = conflictOperation.getResourceId();
    if (!currentShootingWork.getSatelliteId().equals(satelliteId) ||

!VolumeUseOperation.of(currentShootingWork).getPeriod().overlaps(conflictPeriod))
        throw new ScheduleChangedException();
    AvailabilityConstraintValidator acValidator = new
AvailabilityConstraintValidator(availabilityConstraintValidator);
    acValidator.addConstraint(new AvailabilityConstraint(RandomUtil.randomLong(RANDOM),
        new ResourceRef(satelliteId, ResourceRef.ResourceType.Satellite),
conflictPeriod));
    ResolveConflictResult resolveConflictResult = resolveConflict(agent, null, moves,
maxCompensation, acValidator);
    List<Move> resolveMemoryConflictMoves = resolveConflictResult.getMove() != null ?
Collections.singletonList(resolveConflictResult.getMove()) : Collections.emptyList();
    return new ResolveMemoryConflictResult(resolveMemoryConflictMoves,
resolveConflictResult.getStatus());
}
private Iterator<ShootingWorkOption> getWorseShootingOptions(ShootingWork shootingWork)
{
    IShootingWorkOptionProvider shootingWorkOptionProvider =
context.getShootingWorkOptionProviderFactory().getInstance(taskId);
    return
shootingWorkOptionProvider.getEqualsAndWorseShootingWorkOptionsIterator(shootingWork ==
null ? null : shootingWork.getShootingWorkOption());
}
private Iterator<ShootingWorkOption> getBetterShootingOptions(ShootingWork
shootingWork) {
    IShootingWorkOptionProvider shootingWorkOptionProvider =
context.getShootingWorkOptionProviderFactory().getInstance(taskId);
    return shootingWorkOptionProvider.getBetterShootingWorkOptionsIterator(shootingWork
== null ? null : shootingWork.getShootingWorkOption());
}
private long shootingWorkOptionForShootingWorkIndexOf(ShootingWork shootingWork) {
    IShootingWorkOptionProvider shootingWorkOptionProvider =
context.getShootingWorkOptionProviderFactory().getInstance(taskId);

```

```

        return shootingWork == null ? -1 :
shootingWorkOptionProvider.getShootingWorkOptionIndex(shootingWork.getShootingWorkOption())
;
    }

```

//Метод создания варианта перестановки

```

private Move createMove(Long taskId, ShootingWork prevShootingWork, ShootingWork
nextShootingWork) throws ScheduleChangedException {
    if (!Objects.equals(schedule.getShootingWorkByTaskId(taskId).orElse(null),
prevShootingWork))
        throw new ScheduleChangedException();
    long prevPositionIndex =
shootingWorkOptionForShootingWorkIndexOf(prevShootingWork);
    long nextPositionIndex =
shootingWorkOptionForShootingWorkIndexOf(nextShootingWork);
    return new Move(taskId, prevShootingWork, nextShootingWork, prevPositionIndex,
nextPositionIndex);
}

private static double totalObjectiveFunctionDelta(Collection<Move> moves) {
    return moves.stream().mapToDouble(Move::objectiveFunctionDelta).sum();
}

private static Multimap<Long, Conflict> groupConflictsByTask(Collection<Conflict>
conflicts) {
    return
conflicts.stream().collect(MultimapCollector.toMultimap(Conflict::getConflictTaskId));
}

public double getPriority() {
    PointObjectForShootingTask task = schedule.getTaskById(taskId).get();
    Long objectForShootingId = task.getShootingArea().getObjectForShooting().getId();
    return schedule.getObjectForShootingById(objectForShootingId).get().getPriority();
}

```

//Результаты разбора конфликтов

```

private enum ResolveConflictStatus {
    //Разрешен
    Resolved,
    //Неразрешен
    Unresolved,
    //Отсутствует
    Absent
}
}

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. НАБОР ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ В ФОРМАТЕ TLE**

SATELLITE 85

1 41983U 17008AM 19156.43988248 +.00001261 +00000-0 +51946-4 0 9998
2 41983 097.4097 224.1639 0007718 180.8687 179.2539 15.25941969127806

SATELLITE 46

1 42031U 17008CM 19156.73905705 +.00000815 +00000-0 +35181-4 0 9990
2 42031 097.4071 223.9478 0007283 193.6209 166.4833 15.25353892127997

SATELLITE 59

1 42022U 17008CC 19156.86957671 +.00002063 +00000-0 +82186-4 0 9997
2 42022 097.4073 224.3878 0007588 175.3392 184.7919 15.26345579126896

SATELLITE 79

1 41984U 17008AN 19156.75404278 +.00000731 +00000-0 +31813-4 0 9992
2 41984 097.4100 224.2111 0007713 179.6846 180.4398 15.25363109127830

SATELLITE 33

1 41990U 17008AU 19156.75801200 +.00000841 +00000-0 +36185-4 0 9994
2 41990 097.4077 223.9622 0007505 174.8282 185.3035 15.25354583127314

SATELLITE 84

1 42021U 17008CB 19156.24322886 +.00001555 +00000-0 +64470-4 0 9993
2 42021 097.4098 223.6476 0008135 180.1961 179.9275 15.25376307127752

SATELLITE 58

1 41977U 17008AF 19156.12516948 +.00000953 +00000-0 +40619-4 0 9993
2 41977 097.4075 223.2601 0007846 177.7452 182.3823 15.25370522127892

SATELLITE 66

1 42027U 17008CH 19156.87853885 +.00001039 +00000-0 +44040-4 0 9994
2 42027 097.4076 224.1132 0007632 190.6756 169.4321 15.25366059127960

SATELLITEP 4

1 43122U 18004M 19156.74077366 +.00000532 +00000-0 +25870-4 0 9993
2 43122 097.4923 224.2917 0008536 305.0412 055.0023 15.22696014077502

SATELLITE 56

1 42042U 17008CY 19156.76148913 +.00001893 +00000-0 +74647-4 0 9992
2 42042 097.4067 224.7755 0006368 196.5394 163.5638 15.26791433127844

SATELLITE 2

1 41966U 17008U 19156.85473936 +.00001246 +00000-0 +52226-4 0 9993
2 41966 097.4073 223.9434 0008297 172.4749 187.6615 15.25366743127843

SATELLITE 37

1 41953U 17008F 19156.85216249 +.00002096 +00000-0 +82081-4 0 9997
2 41953 097.4081 225.0426 0006578 193.1495 166.9573 15.26904909128072

SATELLITE 16

1 42011U 17008BR 19156.73462840 +.00000778 +00000-0 +33843-4 0 9997
2 42011 097.4069 223.9024 0006709 196.5555 163.5465 15.25199718127160

SATELLITE 13

1 42040U 17008CW 19156.84700410 +.00002082 +00000-0 +83591-4 0 9994
2 42040 097.4075 224.2904 0006667 196.0793 164.0235 15.26084667127182

SATELLITE 35

1 41989U 17008AT 19156.19330196 +.00001657 +00000-0 +67714-4 0 9999
2 41989 097.4080 223.4871 0007620 173.5859 186.5478 15.25763151127231

SATELLITE 65

1 42028U 17008CJ 19156.87799766 +.00000880 +00000-0 +37731-4 0 9994
2 42028 097.4080 224.1253 0007475 191.0267 169.0808 15.25368373127863

SATELLITE 20

1 41950U 17008C 19156.19147550 +.00000944 +00000-0 +40203-4 0 9999
2 41950 097.4068 223.2337 0008949 178.7428 181.3834 15.25400587127908

SATELLITE 3

1 41968U 17008W 19156.13361001 +.00000955 +00000-0 +40690-4 0 9993
2 41968 097.4066 223.1837 0008278 176.1092 184.0212 15.25354083127812

SATELLITE 21

1 41959U 17008M 19156.87533540 +.00002333 +00000-0 +93553-4 0 9991
2 41959 097.4069 224.0781 0008464 174.7298 185.4031 15.25985636127854

SATELLITE 19

1 41955U 17008H 19156.85938096 +.00000879 +00000-0 +37686-4 0 9998
2 41955 097.4062 223.8477 0008866 175.3693 184.7629 15.25367457127922

SATELLITE 7

1 41970U 17008Y 19212.14171620 .00001757 00000-0 69245-4 0 9994
2 41970 97.4037 279.2827 0007627 4.5840 355.5468 15.26916597136303

SATELLITE 31

1 42049U 17008DF 19211.74676551 +.00000942 +00000-0 +40037-4 0 9993
2 42049 097.4045 278.3390 0007859 008.2077 351.9288 15.25494316134997

SATELLITE 5

1 41971U 17008Z 19211.72081114 +.00001475 +00000-0 +59646-4 0 9997
2 41971 097.4043 278.5162 0008025 007.7212 352.4148 15.26285918136156

SATELLITE 28

1 41960U 17008N 19211.73407939 +.00001300 +00000-0 +53620-4 0 9996
2 41960 097.4042 278.3031 0008042 004.4671 355.6637 15.25840039136291

SATELLITE 87

1 42044U 17008DA 19211.73768216 +.00000905 +00000-0 +38575-4 0 9990
2 42044 097.4066 278.5698 0008117 009.2839 350.8547 15.25492644135701

SATELLITE 54

1 42014U 17008BU 19211.76731292 +.00000857 +00000-0 +36688-4 0 9993
2 42014 097.4045 278.4199 0007927 031.0145 329.1560 15.25480550136383

SATELLITE 25

1 41964U 17008S 19211.77896360 +.00001447 +00000-0 +58377-4 0 9990
2 41964 097.4024 278.4808 0008107 002.1945 357.9328 15.26398919136219

SATELLITE 78

1 42047U 17008DD 19211.75441362 +.00001323 +00000-0 +54249-4 0 9996
2 42047 097.4068 278.7405 0007795 008.2554 351.8812 15.25998782135540

SATELLITE 29

1 42045U 17008DB 19211.75279734 +.00001485 +00000-0 +60477-4 0 9995
2 42045 097.4041 278.4851 0007538 006.8031 353.3308 15.26047300135561

SATELLITE 43

1 42007U 17008BM 19211.77587617 +.00001370 +00000-0 +56296-4 0 9994
2 42007 097.4059 278.5148 0007973 026.7677 333.3972 15.25880247136388

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018664429

**Программа планирования целевого применения
группировки аэрокосмических систем дистанционного
зондирования Земли для решения задач точного земледелия**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования "Самарский
национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева" (Самарский университет) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № **2018661668**

Дата поступления **23 октября 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 ноября 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Авторы: *Травин Виталий Сергеевич (RU), Скобелев Петр Олегович (RU), Жилев Алексей Александрович (RU), Галицкая Анастасия Вячеславовна (RU), Мишутин Дмитрий Евгеньевич (RU), Галузин Владимир Андреевич (RU)*

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019617198

Система планирования заявок на проведение сеансов связи
в сети распределенных наземных станций приема данных
с космических аппаратов

Правообладатель: *Непубличное акционерное общество "Группа компаний "Генезис знаний" (НАО "ГК "Генезис знаний") (RU)*

Авторы: *Травин Виталий Сергеевич (RU), Скобелев Петр Олегович (RU), Галузин Владимир Андреевич (RU), Галицкая Анастасия Вячеславовна (RU), Мордасова Оксана Вячеславовна (RU)*

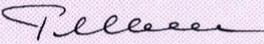
Заявка № 2019615740

Дата поступления 20 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 июня 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022615695

**Сетецентрическая цифровая платформа для
планирования ресурсов группировки малых
космических аппаратов**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственная компания «Сетецентрические
Платформы» (RU)*

Авторы: *Скобелев Петр Олегович (RU), Галицкая Анастасия
Вячеславовна (RU), Галузин Владимир Андреевич (RU),
Новичков Дмитрий Евгеньевич (RU), Травин Виталий
Сергеевич (RU), Мочалкин Александр Николаевич (RU)*

Заявка № 2022615111

Дата поступления 29 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 апреля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ГАЛУЗИНА В.А.
В НАО «ГРУППА КОМПАНИЙ «ГЕНЕЗИС ЗНАНИЙ»**

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
НАО «ГК «Генезис знаний»



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Галузина Владимира Андреевича
«Методы и средства согласованного планирования разделяемых ресурсов для цифровых платформ
управления орбитальными группировками дистанционного зондирования Земли»

Комиссия в составе:

Председатель

Грачев С.П. – генеральный директор НАО «ГК «Генезис знаний»;

Члены комиссии:

Ларюхин В.Б. – директор по разработкам НАО «ГК «Генезис знаний»;

Елисеев В.Г. – ведущий аналитик НАО «ГК «Генезис знаний»

составили настоящий акт о том, что в проекте «Разработка информационной технологии (платформы) совместного использования в ресурсных центрах распределенных наземных станций приема данных с космических аппаратов», реализованного при поддержке Фонда содействия инновациям (договор №371ГРНТИС5/42688) были использованы следующие результаты диссертационной работы Галузина Владимира Андреевича «Методы и средства согласованного планирования разделяемых ресурсов для цифровых платформ управления орбитальными группировками дистанционного зондирования Земли»:

- 1) методы расчета баллистики и видимости космических аппаратов и пунктов приема информации;
- 2) программные средства построения планов приема данных с космических аппаратов наземными станциями на основе мультиагентных технологий.

Председатель комиссии:

Грачев С.П.

Члены комиссии:

Ларюхин В.Б.

Елисеев В.Г.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ГАЛУЗИНА В.А.
В ООО «НПК «СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ»**



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Галузина Владимира Андреевича
«Методы и средства согласованного планирования разделяемых заказов для цифровых платформ
управления орбитальными группировками дистанционного зондирования Земли»

Комиссия в составе:

Председатель

Мочалкин А.Н. – генеральный директор ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

Члены комиссии:

Новичков Д.Е. – директор по производству ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

Андреева М.Е. – аналитик ООО «НПК «Сетецентрические платформы»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Сетецентрические платформы» интеллектуальных систем управления группировкой космических аппаратов для предприятия «СТТ групп», выполняемых по заказу АО «Корпорация ВНИИЭМ» согласно договору №19/29-ОКР от 26.07.2017г. на выполнение СЧ ОКР шифр «Разбег-НС-ЦПР», были использованы следующие результаты диссертационной работы Галузина Владимира Андреевича «Методы и средства согласованного планирования разделяемых ресурсов для цифровых платформ управления орбитальными группировками дистанционного зондирования Земли»:

- 1) модель данных, классы агентов и методы их взаимодействия в ПВ-сети, которые обеспечили возможность планирования до 20 тысяч заявок на точечную и площадную съемку в ситуационном центре;
- 2) программные средства построения интеллектуальных систем управления ресурсами группировок космических аппаратов на основе мультиагентных технологий.

Председатель комиссии:

Мочалкин А.Н.

Члены комиссии:

Новичков Д.Е.

Андреева М.Е.