

*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

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Скобелев Петр Олегович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты: **Городецкий Владимир Иванович,**  
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «Эврика», г. Санкт-Петербург;

**Москвитин Алексей Эдуардович,**  
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), г. Москва.

Защита состоится «1» июня 2023 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02; тел. (846) 337-04-43, e-mail: zoteev-ve@mail.ru

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.02



Зотеев В.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИТИКА РАБОТЫ

**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 в других областях.

В ответ на рост объемов заказов услуг ДЗЗ, представляющих собой заявки на съемку районов интереса (РИ), растет и число запускаемых малых космических аппаратов (МКА), отличающихся своими функциональными и стоимостными возможностями. Так, компания Planet Labs работает над группировкой из 200 МКА, в BlackSky Global планируется 60 МКА ДЗЗ и 17 пунктов приема информации, проект «Сфера» Роскосмоса рассчитан на 600 МКА.

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. В этом случае платформа должна выполнять функции согласованного планирования множества заказов в общем пуле МКА, играя роль «космического юбера<sup>1</sup>» рынка ДЗЗ и позволяя потребителям через «одно окно» подавать запросы на съемку РИ, распределять МКА и пункты приема информации (ППИ), планировать услуги ДЗЗ и предоставлять результаты потребителям. Согласованность планирования означает, что итоговое расписание работы МКА и ППИ формируется через выявление и разрешение конфликтов между ранее запланированными заявками, которые имеют свои предпочтения и ограничения. В результате сервис согласованного планирования цифровой платформы должен формировать и поддерживать баланс интересов элементов системы, каждый из которых имеет свою собственную целевую функцию, например, один из заказов требует максимальную оперативность, а другой – наибольшее разрешение.

При этом число заявок на съемку ДЗЗ становится столь велико, что не только вручную, но и автоматически, на основе известных методов планирования или имитационного моделирования, получать адекватные планы, учитывающие индивидуальные особенности заказов, МКА и ППИ, не представляется возможным. Более того, часто возникают ситуации, когда в начале дня рабочая программа для орбитальной группировки (ОГ) МКА ДЗЗ формируется в течение нескольких часов и отправляется в центр управления полетами, после чего неожиданно поступают новые, более срочные заявки на съемку, требующие перестроения полученного решения, однако времени для этого уже нет или возникают большие задержки. В связи с этим требуется адаптивная коррекция плана работы группы МКА и ППИ для получения результата «здесь и сейчас».

В этих условиях применение традиционных комбинаторных и эвристических методов и средств планирования МКА оказывается ограниченным. Главными их недостатками являются трудность одновременного учета конфликтных интересов участников, вычислительная сложность получения решения с ростом числа заявок, МКА и ППИ, а также трудность адаптивного перестроения планов по событиям, таким как поступление нового заказа или выход из строя одного из МКА.

---

<sup>1</sup> От «юберизация» – замена посредников (людей или организаций) цифровыми платформами

Альтернативный подход к планированию группировок МКА был предложен А.В. Соллогубом и П.О. Скобелевым на основе мультиагентной модели сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) в 2010 году, где в качестве агентов потребностей выступают агенты заявок, а в качестве агентов возможностей – агенты МКА и ППИ. Дальнейшие исследования в этом направлении, проведенные А.А. Жилиевым, позволили в 2017 году создать прототип мультиагентной системы для адаптивного планирования МКА, но пригодный лишь для планирования небольшого числа заявок (до 300), причем только для объектовой съемки.

За рубежом исследования в этом направлении были начаты примерно в это же время в работах К. Schilling из Вюрцбургского университета (Германия). В настоящее время это направление активно развивается и в ряде других научных центров, что отражено в работах J. Bonnet, X. Zhu, G. Picard, S. Phillips и 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 только объектовой съемки и не пригодны для площадных РИ, перестают быть применимы со 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.

**Цель диссертационного исследования** – разработка методов и средств согласованного планирования разделяемых ресурсов в цифровой платформе управления группировками малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для повышения оперативности<sup>2</sup> выполнения заявок потребителей и получения изображений требуемого качества<sup>3</sup>.

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.

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

<sup>3</sup> 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).

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, отличающаяся 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»<sup>4</sup>, что обеспечивает разрешение конфликтов по совместному использованию разделяемых ресурсов, пакетную обработку большого числа заявок и работу с площадными районами интереса.

---

<sup>4</sup> 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 МКА ДЗЗ 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).

**Публикации.** Результаты опубликованы в 17 научных работах, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК, 8 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 5 работ – в трудах международных и всероссийских конференций. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад аспиранта.** В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: [1], [14] – разработка метода планирования площадных РИ; [2] – обзор работ по проблеме планирования работы орбитальных группировок (ОГ) ДЗЗ; [3], [12] – принципы реализации подхода для управления ресурсами в цифровой платформе ОГ ДЗЗ; [5] – разработка модифицированной модели ПВ-сети и метода согласованного планирования заявок на съемку на ресурсы ОГ ДЗЗ, проведение экспериментальных исследований; [6], [7], [13] – особенности анализа данных ДЗЗ; [8], [9], [10] –

постановка задачи, разработка функций и архитектуры сервиса согласованного планирования ОГ МКА ДЗЗ, проведение экспериментальных исследований; [17] – постановка задачи, разработка подхода к автономному управлению миссией ОГ МКА; [15], [16] – разработка цифровой платформы управления ОГ МКА ДЗЗ.

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

**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.

Рассматриваются низкоорбитальные ОГ МКА ДЗЗ, которые имеют период облета Земли от десятков минут до нескольких часов. МКА, входящие в состав ОГ ДЗЗ, обладают двумя степенями свободы: по крену и по тангажу. В ходе полета каждый МКА может снять несколько изображений, изменяя угол камеры, пока не заполнится память, которые далее он должен передать на ППИ.

Предложенная модель ОГ ДЗЗ состоит из 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 крена<sup>5</sup>  $maxRollAngle_i$  и тангажа<sup>6</sup>  $maxPitchAngle_i$ , позволяющие контролировать направление и время съемки, а также параметры установленной на него съемочной аппаратуры (фокусное расстояние  $f$  и размеры матрицы  $matx$ , определяющие 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  $gs_j$  можно 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

<sup>5</sup> Крен – поворот аппарата вокруг его продольной оси

<sup>6</sup> Тангаж – угловое движение аппарата относительно главной поперечной оси инерции



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. Состав МКА и ППИ может меняться с течением времени. 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 ограничения: 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.

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  $drop_k$  с 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  $receive_j$  с 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  $gsVis = \{gsVis_j^l\}$ .

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  $T^{receive} = \{t_k^{receive}\}$ :  $T^o = \{t_k^o\} = T^{imag} \cup T^{drop} \cup T^{receive}$ .

Необходимо найти для каждой заявки интервалы выполнения операции съемки РИ  $t_k^{imag}$ , передачи данных МКА  $t_k^{drop}$  и приема данных ППИ  $t_k^{receive}$ , а также углы крена  $rollAngle_k$  и тангажа  $pitchAngle_k$  МКА при съемке. При этом 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:

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

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

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

где  $OF_k$  – ЦФ  $k$ -ой заявки,  $E(OF_k) = [0;1]$ ,  $M$  – количество критериев планирования,  $c_m^k$  – весовой коэффициент  $m$ -ого критерия планирования для  $k$ -ой 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  $k$ -ой заявки,  $E(F_m^k) = [0;1]$ ,  $res_k$  – 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:

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

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:

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

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.

**Во второй главе** выполнен обзор существующих методов планирования ресурсов ОГ ДЗЗ и показаны ограничения их применимости для решения поставленной новой задачи.

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

1. Планирование работы группировок МКА.
2. Планирование работы МКА с несколькими степенями свободы.
3. Планирование объектовой съемки.
4. Планирование площадной съемки.
5. Учет приоритетов заявок.
6. Учет использования объемных ресурсов.
7. Учет возможной облачности.
8. Планирование сеансов связи с ППИ.
9. Динамическое перестроение расписания по событиям.

В таблице 1 маркерами показаны задачи, решаемые в рассмотренных работах.

Таблица 1 – Перечень задач планирования МКА, решаемых в различных работах

Работа \ № 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	+		+			+	+	+	+
L. He, 2019	+	+	+			+	+		+
В. Городецкий, 2017	+		+						+
А. Жилиев, 2016	+		+			+		+	+
Ю. Горелов, 2018	+	+	+	+					
<i>Предлагаемый метод</i>	+	+	+	+	+	+		+	+

В качестве применяемых методов в указанных работах, в основном, используются классические методы, методы машинного обучения и генетические алгоритмы. 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 ПВ-сети для управления ОГ МКА ДЗЗ была модифицирована для обеспечения пакетного

режима работы 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.

Базовые агенты ПВ-сети доработаны для предметной области целым рядом алгоритмов расчетов: баллистика, особенности съемки и сброса информации и др. В таблице 2 представлены основные классы агентов разработанного метода.

Таблица 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 – количество областей, соответствующих точечным РИ
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

В разработанной мультиагентной модели ПВ-сети расписание МКА и станций самоорганизуется на виртуальном рынке системы в ходе переговоров с уступками агентов заказов и ресурсов, направленных на выявление и разрешение конфликтов с взаимными компенсациями.

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. Кроме того, 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  $OF_k(o_k)$  (1), 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.

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  $pr_k \{r_k | k \neq m, pr_k \geq pr_m\}$ . 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.

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  $F_1^k$  (2) и качества получаемой информации  $F_2^k$  (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. По окончании 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  $t_k^o$ ), 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).

Вследствие выполнения параллельных вычислений, найденное агентом размещение  $t_k^o$  может оказаться неактуальным, если в часть расписания, связанную с ним, внесены изменения другим активным агентом  $t_k^o \cap t_p^o \neq \emptyset, k \neq p$ . В таком случае выполняется повторный поиск варианта для размещения.

На стадии разбора конфликтов 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.

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

где  $SF_k$  – функция удовлетворенности агента заявки,  $E(SF_k) = [0; 1]$ ,  $o_k^o$  – 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)  $\{oAgent_k | k \neq m, SF_k(t_k^o) \leq SF_m(t_m^o)\}$ . На последующих итерациях в очередь помещаются заявки, потенциально затронутые перестановками на предыдущей

итерации. Запуск агентов выполняется параллельно аналогично бесконфликтной стадии. 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  $\Delta SF_k$ . Цепочка перестановок считается успешной, если агент активного заказа  $oAgent_k$  может компенсировать потери всем конфликтующим агентам за счет достигаемого прироста  $\Delta SF_k$ :  $\Delta SF_k + \sum_{i \neq k}^n \Delta SF_i > 0$ .

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.

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  $\Delta SF_k$ , 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  $R^n$ . 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

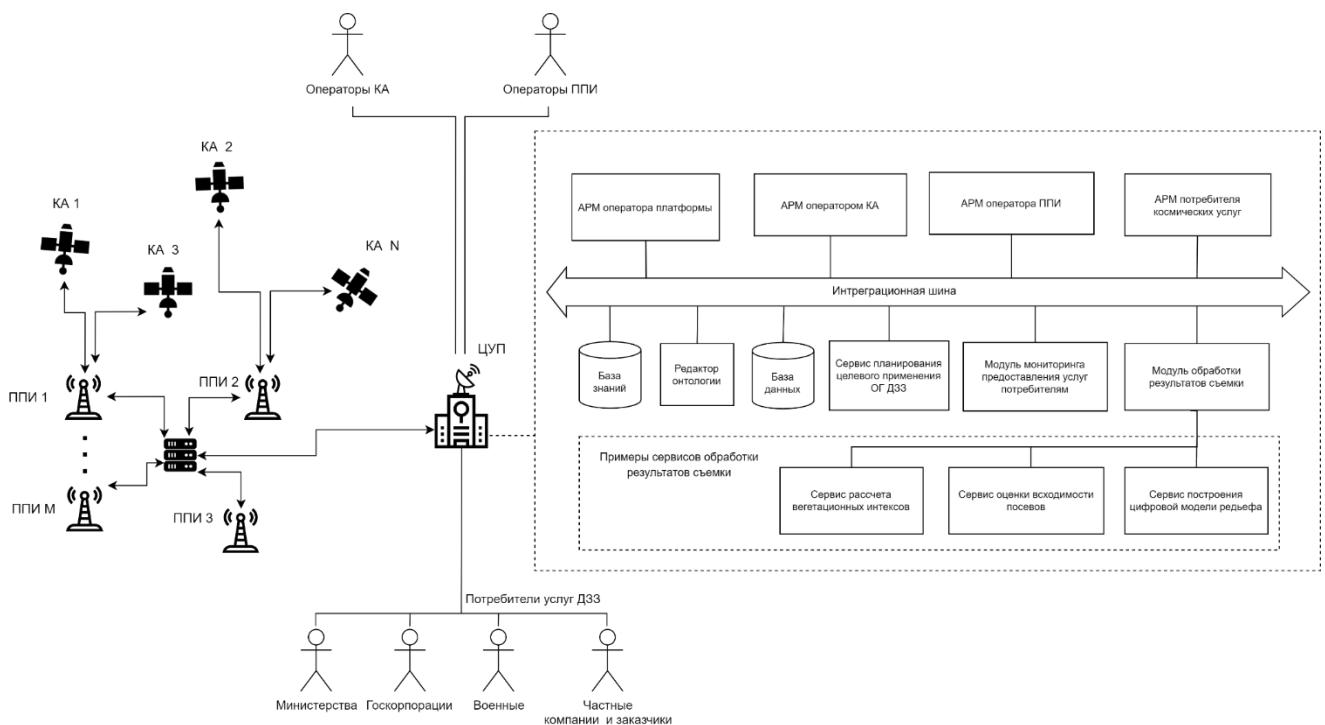
движения МКА, с учетом ограничений на их взаимное перекрытие. После разбиения площадного РИ планирование его частей выполняется по представленному ранее методу до полного покрытия данного РИ.

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. Для этого 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 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 системе реализован функционал по мониторингу исполнения заказов, который позволяет отслеживать своевременное исполнение расписания и в случае срыва сроков автоматически запускать перепланирование.

В четвертой главе приводится функциональная архитектура разработанной цифровой платформы (Рисунок 1) с описанием функций основных модулей, а также показывается реализация сервиса планирования на языке Java.



При поступлении заявки на выполнение съемки РИ из базы данных запрашиваются параметры, необходимые для ее выполнения. Пользователь вводит дополнительные данные, связанные с заявкой. Далее осуществляется

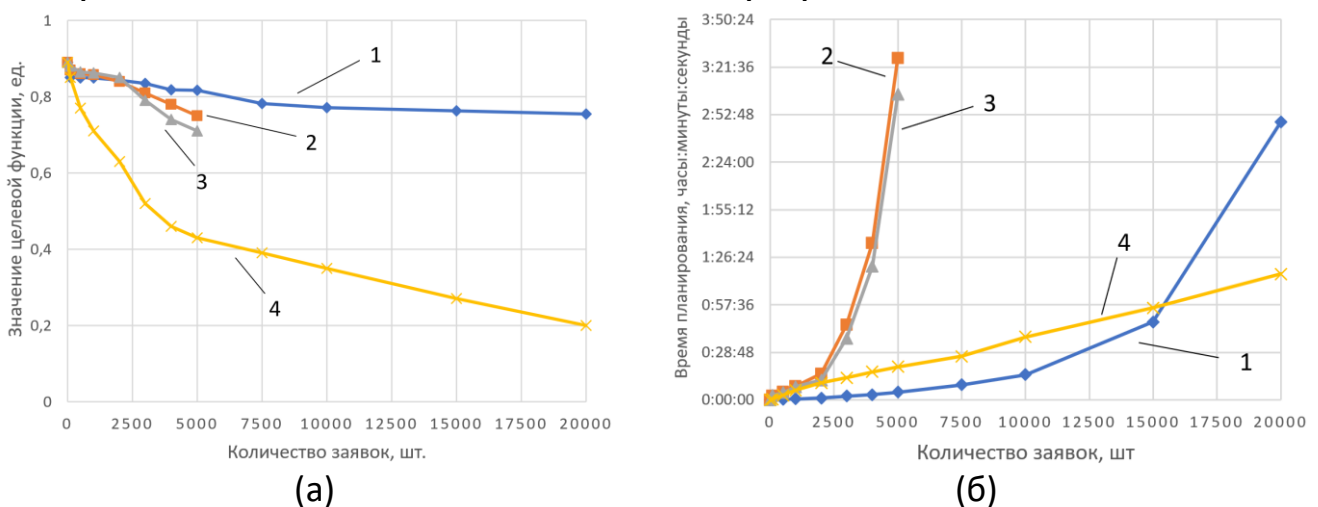


стратегическое планирование. Построенный план отправляется на *модуль мониторинга*, контролирующей своевременное получение снимков. При поступлении снимков формируются задания на их обработку. Если снимки не получены вовремя, осуществляется перепланирование. Обработанные снимки помещаются в *базу данных*, а информации полученная в результате обработки, возвращается на *модуль мониторинга*, который проверяет, соответствуют ли результаты ожидаемым. Если нет, то формируется заявка на проведение дополнительной съемки.

Связь с МКА осуществляется через оператора ДЗЗ, который, после получения готового плана целевого применения ОГ, формирует на его основе перечень команд управления МКА и производит закладку программы на борт.

**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. Эксперименты проводились на персональном компьютере с центральным процессором Intel Core i7-3770 (4 ядра/8 потоков) и оперативной памятью объемом 8 ГБ, операционная система – Windows 10. Адекватность качества расписания оценивалась экспертами.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей значения суммарной целевой функции заявок  $OF = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N OF_k$  (а) и времени планирования (б) от количества заявок, полученные в ходе проведения анализа эффективности разработанного метода в сравнении с известными методами по качеству полученного расписания и временным затратам, необходимым на его составление. Для проведения исследований использовалась модель ОГ МКА ДЗЗ, в состав которой входит 30 МКА, а наземный комплекс системы представлен сетью из 10 ППИ. В ходе исследования проведена серия экспериментов, в которых моделировался случайный поток заявок на съемку РИ, распределенных по нормальному закону. Количество заявок изменялось от 100 до 20000. Горизонт планирования в зависимости от числа заявок варьировался от 1 дня до 14 дней.



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

Рисунок 2 – Графики зависимости значения целевой функции системы (а) и времени планирования (б) 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, было показано, что 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.

**В шестой главе** приводится описание разработки и результатов 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.

ОГ МКА, планирование работы которой было необходимо произвести, имела следующие параметры. Число планируемых МКА – 24. Высота полета МКА – 300 км. Полоса захвата – 15 км. Полоса обзора – 300 км. Витков в сутки – 70. Вначале выполнялось построение плана на горизонте от 10 суток до 4 недель, после чего полученный план актуализировался по событиям дважды в сутки, предусматривались и более частые обновления плана по событиям.

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 заключении** диссертации формулируются основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

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 обработки 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 груп» в интересах АО «Корпорация «ВНИИЭМ», а также для моделирования работы группировок аппаратов РКЦ «Прогресс» и Сколковского института науки и технологий.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В изданиях, рекомендованных ВАК*

1. 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.

2. 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.

3. Галузин, В.А. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилиев, 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.

4. 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 СамГТУ. Серия «Технические науки». 2022. Т. 30. №1, С. 20-45.

*В изданиях, индексируемых в Scopus*

5. 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.

6. 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

7. 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

8. 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.

9. 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.

10. 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. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12946, – P. 267-278

11. 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

12. 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

*В других изданиях*

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

14. 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.

15. 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)», СПб, 6–8 октября 2020 г. – С. 59-63.

16. 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.

17. 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, Online, February 3-5, 2022, vol. 1. – SCITEPRESS. – P. 408-416.

*Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ*

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664429. Программа планирования целевого применения группировки аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли для решения задач точного земледелия / В.С. Травин, П.О. Скобелев, А.А. Жилиев, Д.Е. Мишутин, А.В. Галицкая, В.А. Галузин. Зарегистрировано 16.11.2018. – М.: Роспатент, 2018

19. 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 / В.С. Травин, П.О. Скобелев, А.В. Галицкая, В.А. Галузин, О.В. Мордасова. Зарегистрировано 04.06.2019. – М.: Роспатент, 2019

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615695. Сетецентрическая цифровая платформа для планирования ресурсов группировки малых космических аппаратов / П.О. Скобелев, А.В. Галицкая, В.А. Галузин, Д.Е. Новичков, В.С. Травин, А.Н. Мочалкин. Зарегистрировано 01.04.2022. – М.: Роспатент, 2022

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 4 от «23» марта 2023 г.)

Заказ №100. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано на типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244