

УДК 629.78

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ
МЕЖКЛАСТЕРНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ В ГРУППИРОВКАХ МАЛЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ****И.Р. Харисов, В.П. Марков, Р.М. Шехин (Санкт-Петербург)****Введение**

Освоение околоземного космического пространства характеризуется переходом от эксплуатации одиночных космических аппаратов к развертыванию распределенных многоспутниковых группировок (МГ) [1]. Такой подход позволяет кардинально повысить ключевые характеристики систем, в частности, в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивая оперативность предоставления данных. Реализация потенциала МГ невозможна без решения задачи организации эффективного координированного функционирования аппаратов. Перспективным подходом к решению этой задачи является концепция автономного группового управления (АГУ), предполагающая делегирование значительной части функций планирования и принятия решений с наземного контура управления непосредственно на борт малых космических аппаратов (МКА), объединенных в единую информационно-управляющую сеть посредством межспутниковой связи [2].

Разработка и валидация сложных алгоритмов АГУ связаны с методологическими и практическими трудностями. Реальные эксперименты являются дорогостоящими, рискованными и ограниченными по масштабу, что делает их неприменимыми на ранних этапах исследований. В связи с этим ключевую роль приобретает имитационное моделирование [3]. Однако существующие программные средства не в полной мере отвечают специфическим требованиям данной предметной области. С одной стороны, специализированные пакеты для баллистико-навигационного обеспечения (STK, GMAT) моделируют динамику орбитального полета и условия радиовидимости [4], но обладают ограниченными возможностями для моделирования сложной логики поведения, асинхронного информационного взаимодействия и распределенных протоколов принятия решений, лежащих в основе АГУ. С другой стороны, универсальные системы имитационного моделирования (AnyLogic, NS-3, OMNeT++) предоставляют аппарат для моделирования агентного поведения и коммуникационных протоколов, но не содержат встроенных моделей космической среды, динамики движения и функционирования бортовых систем МКА.

Для использования лучших частей от подобных решений и создания комплексного инструментария для исследования технологий АГУ был разработан программный комплекс (ПК). Целью настоящей статьи является представление его архитектуры, функциональных возможностей и демонстрация его практического применения для решения актуальной научной задачи. Научная новизна представленной работы заключается в двух аспектах. Во-первых, это реализация гибкой и масштабируемой клиент-серверной архитектуры, где на стороне сервера функционирует ядро моделирования, включающее дискретно-событийный движок и агентные модели МКА, а на стороне клиента – автоматизированное рабочее место (АРМ) пользователя. Такое разделение позволяет решать вычислительно-интенсивные задачи, предоставляя исследователю интерактивный инструмент для конфигурирования сценариев и анализа результатов. Во-вторых, это модульная структура библиотеки специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО), реализованная на серверной стороне. СМАО инкапсулирует логику АГУ в виде взаимозаменяемых функциональных модулей (планировщик съемок, планировщик

полета, модуль контроля электробаланса и т.д.), что позволяет исследователям тестировать и сравнивать различные алгоритмические подходы, существенно ускоряя цикл разработки и валидации новых технологий управления.

1. Архитектура программного комплекса АГУ МГ

Программный комплекс построен на базе клиент-серверной архитектуры. Данная архитектура позволяет логически и физически разграничить ресурсоемкие вычислительные процессы, выполняемые на серверной стороне, и интерактивную среду пользователя, реализованную в клиентском приложении. Такой подход также закладывает основу для будущей расширяемости, предусматривая возможность интеграции сторонних программных комплексов посредством API.

Общая структура ПК представлена на рис. 1. Связующим звеном и центральным компонентом является программа сервера, которая отвечает за информационный обмен между системой управления базами данных (СУБД) и программами ИМ и СМАО. После того как пользователь инициализирует старт моделирования, программа сервера обращается к базе данных (БД) и по уникальному унификатору клиента возвращает все связанные с ним исходные данные (ИД) эксперимента, который пользователь задает на АРМ перед стартом моделирования. В ИД также входят предвычисленные планы контактов между КА и наземными пунктами (НП) приема информации и интервалы полносвязной сети [7]. После получения ИД эксперимента сервер инициализирует работу ИМ и получает от него уточняющие данные (УД) эксперимента, включающие баллистику для каждого КА. УД и ИД являются входными данными для библиотеки СМАО. Результат эксперимента передается обратно на клиент и преобразуется в удобные для пользователя формы представления выходных данных.



Рис. 1. Архитектура ПК

Клиентская часть ПК представляет собой веб-приложение, предоставляющее исследователю инструментарий для работы с моделью. АРМ является инструментом для быстрого формирования сложных сценариев моделирования. Через его интерфейс

пользователь может задать орбитальное построение всей группировки. Детально описать технические характеристики и ограничения каждого аппарата. А также сформировать целевые заявки, вычислить планы контактов между КА и НП приема информации и интервалы полносвязной сети. После конфигурирования сценария пользователь инициирует старт моделирования.

Наиболее важной функцией АРМ является возможность всестороннего анализа результатов. Для оценки общей эффективности МГ предусмотрены формы, отображающие агрегированные метрики, такие как статистика выполнения заявок и КРІ по кластерам. Для глубокого анализа поведения отдельного МКА исследователь может визуализировать его план съемок, план полета и лог полета с отображением режимов и динамики изменения заряда АКБ.

2. Оптимизация межкластерного взаимодействия с использованием ПК

Для демонстрации практических возможностей и исследовательской ценности разработанного программного комплекса была решена актуальная задача оптимизации информационного взаимодействия в МГ кластерного построения.

2.1 Постановка исследовательской задачи

Ключевой задачей АГУ является распределение целевых заявок и своевременная доставка полученных данных на Землю. В кластерной группировке, где аппараты разнесены по разным орбитальным плоскостям, возможности для прямой межкластерной связи возникают непостоянно и на ограниченное время [2]. Традиционные подходы, основанные на попарном взаимодействии (когда два кластера обмениваются информацией, как только между ними появляется канал связи), могут приводить к локально-оптимальным, но глобально неэффективным решениям. Например, передача заявки первому встречному кластеру не гарантирует, что именно он является наилучшим исполнителем в рамках всей группировки.

В качестве альтернативы была выдвинута гипотеза о том, что эффективность группового управления можно значительно повысить, если синхронизировать глобальные задачи планирования (такие как перераспределение невыполнимых кластером заявок и оптимизация маршрутов доставки данных) с предсказуемыми временными окнами максимальной связности. Периодически топология межспутниковой сети становится полносвязной [5]. Эти периоды, названные интервалами полносвязной сети (ИПС), представляют собой идеальные окна для проведения глобальных сессий планирования, так как в эти моменты все лидеры кластеров могут обмениваться информацией одновременно. Целью данного примера является верификация этой гипотезы с использованием ПК.

2.2 Реализация в рамках ПК

Для проверки предложенной гипотезы была выполнена серия имитационных экспериментов, процесс подготовки и проведения которых полностью опирался на функционал ПК.

Шаг 1: Конфигурирование космической системы. На начальном этапе с помощью интерфейса АРМ задается полная конфигурация моделируемой космической системы. Это включает в себя определение состава и орбитальных параметров МКА в кластерах, географическое расположение наземных пунктов (НП), данные целевых объектов для ДЗЗ, а также параметры моделей самих космических аппаратов (маневренность, энергопотребление, характеристики бортовой аппаратуры).

Шаг 2: Расчет планов контактов с наземными пунктами. После задания конфигурации системы выполняется первый этап предварительных расчетов.

С использованием модулей баллистического моделирования определяются окна видимости между каждым космическим аппаратом и всеми наземными пунктами на заданном горизонте времени. На основе этих окон формируется план контактов [6], который загружается в базу данных.

Шаг 3: Расчет интервалов полносвязной сети (ИПС). На втором этапе предварительных расчетов аналогичным образом вычисляются коммуникационные возможности для межспутниковой связи. Для заданной конфигурации МГ рассчитываются интервалы времени, в течение которых одновременно выполняются условия прямой и угловой радиовидимости между всеми кластерами, образуя полносвязную сеть. Результаты этих расчетов в виде временных слотов ИПС также сохраняются в базе данных.

Шаг 4: Реализация протоколов управления в СМАО. Логика исследуемой стратегии синхронного взаимодействия реализована на серверной стороне комплекса в рамках библиотеки СМАО. Для этого в движок моделирования были введены системные события «Начало ИПС» и «Окончание ИПС», считываемые из предварительно рассчитанного плана. При наступлении события «Начало ИПС» агенты лидеров кластеров инициируют протокол обмена информацией о невыполнимых заявках и накопленных данных, вырабатывая глобально согласованные решения по их перераспределению.

Шаг 5: Настройка и запуск сравнительных экспериментов. На заключительном этапе подготовки с помощью клиентского интерфейса АРМ формируются сценарии для сравнительного анализа. В рамках данного исследования были сконфигурированы два ключевых сценария. Сценарий без использования ИПС, в котором не используется межкластерная связь. И сценарий с использованием ИПС, который позволяет активировать разработанные протоколы информационного взаимодействия. Переключение между сценариями и запуск симуляции осуществляются непосредственно через опции пользовательского интерфейса.

3 Результаты и их анализ с помощью АРМ

По завершении обоих сценариев АРМ предоставляет исследователю широкий набор инструментов для глубокого сравнительного анализа, позволяя оценить эффект от применения технологии межспутниковой связи.

3.1 Визуализация жизненного цикла заявок

Наиболее наглядно разница в функционировании группировки видна при анализе жизненного цикла отдельных заявок с помощью соответствующей формы АРМ. В сценарии без использования ИПС заявка с именем *A7*, поступившая в *кластер 1* (в КА с названием *1L*), не может быть выполнена им из-за оперативных ограничений. При отсутствии межкластерной связи эта заявка помечается как невыполнимая и фактически теряется для группировки. Пример отображения лога выполнения заявок в этом сценарии представлен на рис. 2.

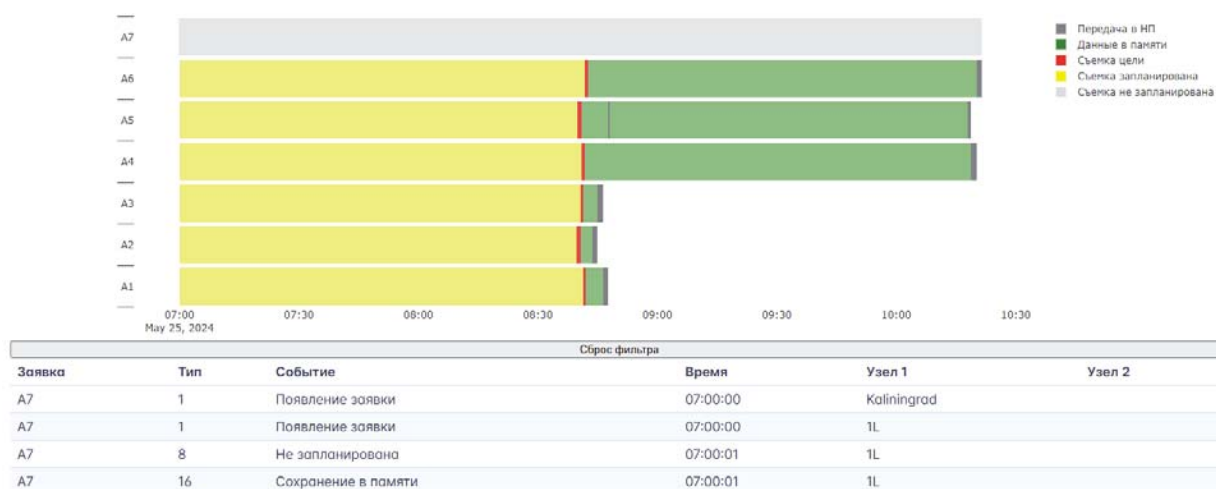


Рис. 2. Лог выполнения заявок при сценарии без использования ИПС

В сценарии с использованием ИПС та же самая заявка сохраняется в памяти лидера *кластера 1* до наступления ближайшего ИПС. В этот момент происходит обмен информацией, и заявка успешно передается *кластеру 2*, который имеет возможность ее выполнить, распределив между своими ведомыми КА. Таким образом, АРМ позволяет визуально отследить и подтвердить работоспособность механизма перераспределения. Пример отображения лога выполнения заявок в этом сценарии представлен на рис. 3.

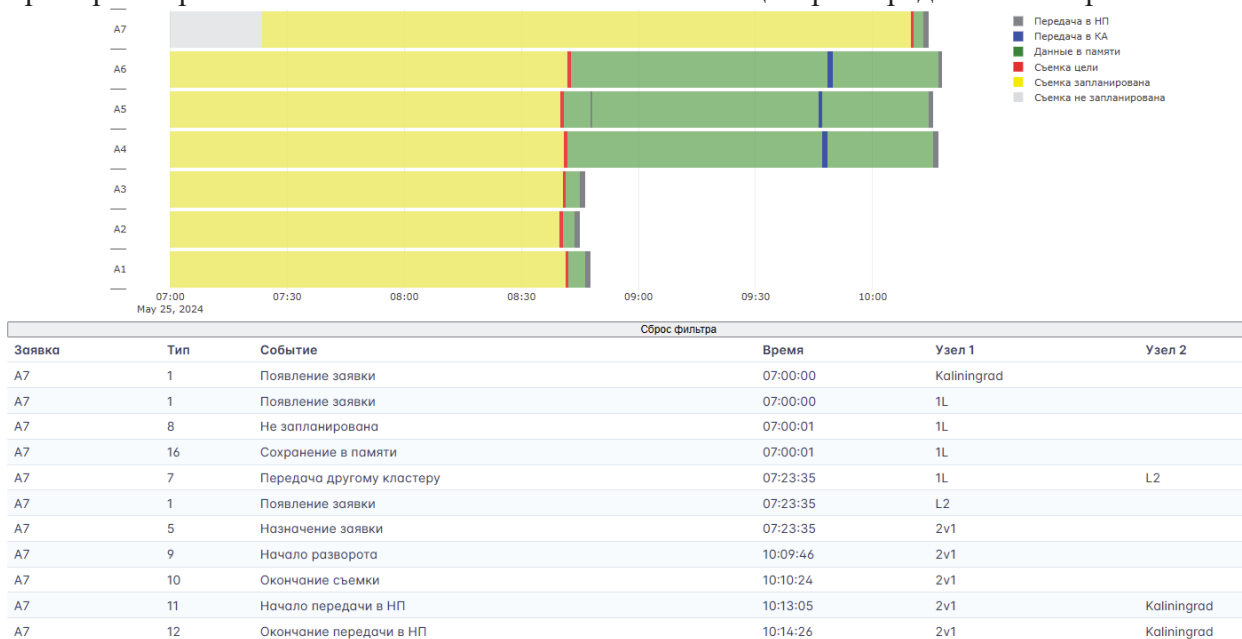


Рис. 3. Лог выполнения заявок при сценарии с использованием ИПС

3.2 Показатели эффективности

Эффективность технологии подтверждается статистическими данными. Сравнение количественных оценок, представленных на рис. 4 (сценарий без ИПС) и рис. 5 (сценарий с ИПС), позволило сделать выводы об эффективности предложенного подхода. Так как среднее время доставки данных сократилось с 51:39 минут до 43:21. Некоторые заявки не только становятся выполнимыми (A7), но и ускоряется их доставка. Данное сравнение иллюстрирует повышение эффективности функционирования системы.

		Ожидание съемки	Время доставки		
Минимальное		01:39:48	00:04:15		
Среднее		01:40:46	00:51:39		
Максимальное		01:41:50	01:38:50		
Заявка	Выполнена	Ожидание съемки	Время доставки	Время передачи	Потери, Мбайт
A1	Да	01:41:21	00:05:35	00:01:22	0
A2	Да	01:39:48	00:04:15	00:01:21	0
A3	Да	01:40:41	00:04:58	00:01:22	0
A4	Да	01:40:56	01:38:25	00:01:22	0
A5	Да	01:40:00	01:37:51	00:01:22	0
A6	Да	01:41:50	01:38:50	00:01:22	0
A7	Нет	-	-	-	0
Кластер	КА	Заявка	Объём потери Мбайт		

Рис. 4. Статистика выполнения заявок без ИПС

		Ожидание съемки	Время доставки		
Минимальное		01:39:48	00:04:02		
Среднее		01:53:28	00:43:21		
Максимальное		03:09:46	01:35:09		
Заявка	Выполнена	Ожидание съемки	Время доставки	Время передачи	Потери, Мбайт
A1	Да	01:41:21	00:05:35	00:01:22	0
A2	Да	01:39:48	00:04:15	00:01:21	0
A3	Да	01:40:41	00:04:58	00:01:22	0
A4	Да	01:40:56	01:35:02	00:01:22	0
A5	Да	01:40:00	01:34:28	00:01:23	0
A6	Да	01:41:50	01:35:09	00:01:04	112
A7	Да	03:09:46	00:04:02	00:01:21	0
Кластер	КА	Заявка	Объём потери Мбайт		
C2	L2	A6	112		

Рис. 5. Статистика выполнения заявок с ИПС

3.3 Анализ нагрузки на аппараты

Внедрение новой технологии неизбежно сказывается на работе отдельных МКА. Межкластерная передача больших объемов данных является энергозатратной операцией. С помощью АРМ был проведен анализ влияния этой дополнительной нагрузки на бортовые системы. На форме «План полета» (рис. 6) для МКА, который в сценарии с использованием ИПС выступал в роли ретранслятора данных, было зафиксировано заметное снижение уровня заряда АКБ в моменты передачи данных по межспутниковой линии. В то же время, анализ последующих витков показал, что КА успеет восполнить заряд и на всем горизонте моделирования не разрядится ниже заданного критического порога. Это демонстрирует не только адекватность моделирования энергетического баланса в ПК, но и подтверждает работоспособность всей системы в условиях повышенных нагрузок.



Рис. 6. План полета МКА для сценария с использованием ИПС

Заключение

В настоящей работе была представлена архитектура и функциональные возможности программного комплекса, предназначенного для имитационного моделирования и всестороннего анализа возможной модели автономного группового управления многоспутниковыми группировками.

Предложенная клиент-серверная архитектура доказала свою высокую эффективность. Она обеспечивает необходимое разделение вычислительно-интенсивных процессов моделирования, выполняемых на серверной стороне, и интерактивных задач конфигурирования и анализа, решаемых с помощью клиентского АРМ. Модульная структура библиотеки специального модельно-алгоритмического обеспечения в сочетании с гибкостью настройки сценариев и средствами визуализации результатов делают ПК удобным инструментом для исследования сложных распределенных систем управления.

Решенная с помощью комплекса задача по оптимизации межкластерного взаимодействия продемонстрировала его практическую применимость. ПК позволил пройти полный цикл исследования: от формализации гипотезы до проведения сравнительных экспериментов и получения доказательств эффективности предложенной стратегии. Результаты показали, что синхронизация глобальных процессов планирования с интервалами полносвязной сети значительно повышает процент выполненных заявок и сокращает среднее время доставки данных ДЗЗ.

Практическая значимость разработанного программного комплекса выходит за рамки чисто научных исследований. ПК может использоваться в качестве тренажера для обучения операторов центров управления полетами и работе с перспективными системами АГУ, стать платформой для проведения широкого спектра научных исследований в области группового применения космических аппаратов, а также помочь инженерам в проектировании КА, позволяя проверить, как поведет себя конкретная конфигурация бортового оборудования будущего аппарата в условиях, близких к реальным.

Литература

1. Павлов А.Н., Колесник Д.Ю., Гордеев А.В. Методика повышения надёжности применения многоспутниковой группы малых космических аппаратов

- дистанционного зондирования Земли // Известия вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 11. С. 975–983. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-975-983.
2. **Карцан И.Н.** Концепция развития межспутниковой лазерной связи // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 2023. № 2 (54). С. 45-54.
 3. **Карсаев О.В., Соколов Б.В.** Имитационное моделирование многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли. 2023.
 4. **Широбоков М.Г., Трофимов С.П.** Библиотека KIAM Astrodynamics Toolbox для проектирования орбитального движения космических аппаратов // Программирование. 2024. № 1. С. 53–65. DOI: 10.31857/S0132347424010058.
 5. **Карсаев О.В., Харисов И.Р., Захаров В.В.** Алгоритм расчета плана контактов между космическими аппаратами и наземными пунктами // Региональная информатика и информационная безопасность. Р32 : сб. трудов. Вып. 13 / СПОИСУ. СПб., 2024. С. 734-739.
 6. **Иванов М.С., Аганесов А.В., Макаренко С.И.** Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. №. 3. С. 183-259.
 7. **Ватутин С. И. и др.** Межорбитальная система передачи данных для управления группировкой малых КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9. №. 3. С. 65-75.