

УДК 629.7

МЕТОДОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Б.В. Соколов, В.В. Захаров, В.А. Зеленцов, О.В. Карсаев,
А.Ю. Кулаков (Санкт-Петербург)**

Введение

В современных условиях создание и применение многоспутниковых группировок (МГ), как традиционных больших («тяжелых») космических аппаратов (КА), так и малоразмерных космических аппаратов (МКА) различного целевого назначения можно считать одним из главных направлений деятельности в космической отрасли таких ведущих мировых держав как США, КНР, Япония, стран, входящих в ЕС, а также РФ. Непременным условием проектирования и разворачивания новых МГ МКА является разработка соответствующих систем управления (СУ) такими группировками. При этом специфика управления МГ МКА определяется прежде всего их целевым предназначением. В качестве основных различают МГ навигационных КА (НКА), МГ КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), МГ КА системы спутниковой связи (ССС) [1-4].

Говоря о текущем состоянии МГ МКА, следует указать, что большая часть (более 70%) из общего количества реально функционирующих МКА предназначена для связи и передачи данных и была выведена на орбиты в основном компанией SpaceX (группировка Starlink), а также OneWeb. При этом значительным является и число МКА наблюдения – их доля в 2024 г. составляла более 13% и постоянно увеличивается. Они в основном контролируются американскими компаниями (Planet Labs, Spire Global), а также организациями из Китая, России, европейских государств. Оператор наиболее крупной группировки МКА наблюдения (более 200 МКА [<https://www.planet.com/faqs/>] – компания Planet Labs (США). Эта группировка включает более 250 спутников. Наземный комплекс управления (НКУ) данной МГ состоит из 12 наземных пунктов (НП) приема специальной информации (СПИ), которые находятся на различных континентах. В этих НП для передачи целеуказаний и приема данных об объектах наблюдения (ОН) в общей сложности используется 36 антенн. В РФ существуют различные типы больших КА (например, КА «Ресурс-П») и МКА (например, «Канопус-В», «Аист-2Д») которые образуют пока немногочисленные группы совместно действующих КА, решающие задачи ДЗЗ в различных диапазонах электромагнитного спектра излучений.

В указанных условиях в качестве одного из наиболее перспективных направлений развития отечественных программ освоения космоса следует рассматривать программу создания и совместного применения КА и МКА различного назначения. В Госкорпорации «Роскосмос» в настоящее время рассматривается проект создания и применения многофункциональной МГ «Сфера», в которой большая часть запускаемых и используемых космических средств будет относиться к классу МКА. Отечественную МГ «Сфера» планируется создавать в виде космической инфраструктуры, в которой должны функционировать несколько специализированных космических группировок, совместно реализующих функции связи, навигации, ДЗЗ. В рамках проекта планируется разработать и запустить до 200 КА и МКА различного функционального назначения, включая КА и МКА ДЗЗ. При этом из-за ограниченных возможностей (прежде всего пропускной способности) отечественного наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) принципиальными особенностями организации процессов управления целевым применением рассматриваемых МГ МКА должны быть

повышенные требования к уровням автономного управления указанными МГ МКА, а также повышенные требования к показателям надежности, живучести и в целом устойчивости их функционирования в условиях возмущающих воздействий [4-7].

Для выполнения указанных требований весьма актуален переход от концепций и технологий традиционного централизованного программно-командного управления к концепциям и технологиям децентрализованного координатного, координатно-временного, ситуационного и, в перспективе, самоорганизующегося автономного группового проактивного планирования и управления МГ МКА. При этом проактивное управление МКА, в отличие от традиционно используемого реактивного управления, гарантированно обеспечивает своевременное принятие и реализацию обоснованных управленческих решений по срокам и объему мероприятий, связанных с переводом данных объектов в требуемое состояние благодаря организации многовариантного упреждающего активного прогнозирования и оперативного парирования отклонений фактических значений компонентов вектора состояния и показателей качества функционирования МКА и МГ МКА в целом от их прогнозных значений с использованием различных видов заранее сформированных либо оперативно синтезированных (в ходе орбитального полета) резервов [4]. Создание и применение данных МГ должно базироваться на принципиально новых методологиях, моделях, методах, алгоритмах и методиках, формируемых в рамках соответствующих новых прикладных теорий управления и ориентированных на последние научные достижения в области системологии, некибернетики, информатики, в том числе искусственного интеллекта [5].

Проведенный анализ показал, что в рассматриваемой области научных исследований множеством отечественных организаций и авторских коллективов, а также соответствующих научных школ выполнен значительный объем научных работ, посвященных вопросам разработки методологических и методических основ исследования и решения вопросов автономного группового управления целевым функционированием перспективных многоспутниковых космических систем ДЗЗ.

Среди отечественных организаций, занимающейся рассматриваемой космической тематикой, можно, в первую очередь, выделить следующие научные учреждения, предприятия, академии, университеты и институты: Главный испытательный космический центр им. Г.С. Титова, Военная академия Воздушно-космической обороны им. Г.К. Жукова, 4 ЦНИИ МшО РФ, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (ВКА), Военная академия РВСН им. Петра Великого, Томский государственный университет, БГТУ «Военмех», Московский авиационный институт (МАИ), НИИ многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета (ЮФУ), Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, СПб ФИЦ РАН, Институт проблем управления сложными системами РАН, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; предприятия оборонно-промышленного комплекса: РКК «Энергия», КБ «Арсенал», ОАО «Российские космические системы», НИИ «Вектор», МОКБ «Марс», АО «ИСС», ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, ЦСКБ «Прогресс», Концерн ВКО «Алмаз-Антей», ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», НПО им. С.А. Лавочкина, АО «НПО «Радар ММС», а также частные организации: космическая компания SR Space, работающая над ракетами-носителями и спутниковыми группировками, «ГЕОСКАН», специализирующаяся на малых космических аппаратах и спутниковой связи, компании ООО «Частная космическая компания «НОЙ», ООО «СТЦ», ООО «СПУТНИКС» [4-14].

С научно-методической точки зрения проблема проактивного управления применением МГ МКА относится к классу проблем динамического структурно-

функционального синтеза информационных технологий и процессов интеллектуального управления как бортовыми системами каждого отдельного МКА, так и системными бортовыми ресурсами и системными режимами функционирования МГ наблюдения, а также соответствующего НКУ, и характеризуется большой размерностью, нестационарностью, нелинейностью взаимосвязей основных параметров, описывающих рассматриваемую предметную область, многокритериальностью и существенной неопределенностью, вызванной воздействием внешней и внутренней возмущающей среды. Понятие системных ресурсов МГ связано с необходимостью обеспечения требуемого гарантированного целевого (системного) эффекта, создаваемого МГ в целом на заданном интервале времени ее активного функционирования (горизонте планирования). Наряду с этим требуется обеспечить равномерность использования бортовых ресурсов МКА, выполнить ограничения по энергопотреблению, объемам используемой памяти МКА и др. Проактивность в данном случае означает учет в моделях и алгоритмах решения задач управления МГ неопределенности, связанной с будущим функционированием МКА и МГ на рассматриваемом горизонте планирования и автономного группового управления (АГУ).

Анализ существующих разработок по созданию технологий управления применением МГ наблюдения [4,5,8] показал, что наибольшее распространение на практике получили эвристические и метаэвристические методы решения задач, а в последнее время – мультиагентные технологии и активно развивающиеся методы машинного обучения [5,10,11]. Разработанные алгоритмы позволяют получать, как правило, субоптимальные планы применения МКА и МГ за приемлемое время, что в большинстве случаев считается соответствующим потребностям практики. Однако значительная часть разработок не базируется на математическом аппарате теории принятия решений и инженерии знаний, и при их использовании не всегда удается оценить степень отклонения полученных решений от оптимальных, и соответственно возможные потери в качестве функционирования МГ. Другая важная особенность существующих разработок – их ориентация в основном на однотипные МКА в составе МГ, и к настоящему времени выполнено недостаточно работ, посвященных планированию применения высокоманевренных разнотипных МКА в составе гетерогенных МГ.

К наиболее перспективным направлениям исследований относится развитие методологии системного (комплексного) распределенного предсказательного (упреждающего) моделирования проактивного управления МГ МКА на основе комплексирования классических методов исследования операций и теории управления с агентно-нейросетевыми подходами и технологиями, интенсивно развиваемыми в рамках искусственного интеллекта (ИИ) [4, 5, 13].

В частности, описываемая в докладе методология комплексного моделирования проактивного интеллектуального управления обеспечивает сочетание преимуществ как классических методов оптимизации, так и методов получения приближенных решений (в том числе основанных на технологиях ИИ), и в значительной степени нивелирует недостатки отдельных методов; в том числе, существует возможность построения эталонных, «идеальных» решений с количественной оценкой качества планов, построенных приближенными методами в условиях ограничений на время решения задач планирования применения и информационного взаимодействия МГ, состоящих из разнотипных МКА [6,12,13].

В контексте реализации ранее разработанной методологии системного (комплексного) моделирования [12] в основу методического обеспечения рассматриваемой ИТ положено полимодельное описание функционирования МГ МКА наблюдения. Данное формальное описание включает в себя совокупность

детерминированных логико-динамических моделей, а именно: M_g – динамические модели управления движением МГ; M_k – динамические модели управления каналами в МГ; M_o – динамические модели управления целевыми и обеспечивающими операциями, проводимыми в МКА; $M_{п}$ – динамические модели управления потоками в МГ; M_r – динамические модели управления ресурсами МГ; M_e – динамические модели управления параметрами операций, проводимыми в МГ; M_c – динамические модели управления структурной динамикой МГ; M_b – динамические модели управления вспомогательными операциями МГ. Данный комплекс моделей в конкретных реализациях дополняется стохастическими логико-динамическими моделями, а также агентно-ориентированными имитационными моделями, описывающими процессы управления применением МГ для различных сценариев воздействия возмущающей среды. Использование ранее разработанных принципов комплексного моделирования позволило на глубинном (модельно-алгоритмическом) уровне описания обеспечить функциональную совместимость (семантическую интероперабельность) моделей за счет предложенных оригинальных процедур ресурсной и целевой модельной координации [12,13].

Приведенный состав полимодельного комплекса является достаточно общим и может варьироваться в зависимости от конкретной задачи управления. Отметим две характерные особенности информационных технологий (ИТ) проактивного управления применением МГ.

Во-первых, разрабатываемая ИТ тесно связана и в значительной степени определяется технологией задействования бортовой аппаратуры МКА при решении задач наблюдения. Управление целевым применением МКА фактически является управлением работой бортовой аппаратуры каждого МКА наблюдения и заключается в определении моментов времени включения и выключения приборов и систем, участвующих в процессе обслуживания (наблюдения, съемки) наземных объектов, а также в определении параметров выполнения программных разворотов МКА в плоскостях тангажа и крена для проведения съемок.

Во-вторых, технология управления МГ является составной частью технологии управления КА, реализуемой в рамках соответствующей АСУ МГ наблюдения. В связи с этим далее будем рассматривать два основных этапа управления применением МГ: этап предварительного планирования применения и этап оперативного управления (коррекции, перепланирования). При этом оно может быть реализовано как с использованием НКУ, так и в режиме автономного группового управления. Такая декомпозиция определяет возможность последовательного рассмотрения двух компонентов общей информационной технологией (ИТ) проактивного управления применением МГ наблюдения: ИТ планирования применения МГ и ИТ оперативного управления применением МГ.

Информационная технология проактивного планирования применения МГ МКА наблюдения

Основными процессами, определяющими содержание информационной технологии проактивного планирования применения МГ, являются [8]:

- формирование системы целевых функций и ограничений, конкретизирующих задачи планирования применения МГ и организации процессов приема, хранения, обработки и передачи специальной информации;
- формирование оптимальных или близких к оптимальным расписаний съемок объектов наблюдения МКА из состава МГ в соответствии с поступившим набором заявок на заданном горизонте планирования;

– формирование планов приема, хранения, обработки и передачи специальной информации на наземные пункты (планов информационного взаимодействия).

Данные процессы могут реализовываться для двух вариантов структуры системы управления: с использованием и без использования НКУ. Исходя из сложившейся практики эксплуатации МКА, в качестве значения длительности временного интервала, на который формируется план съемки объектов наблюдения, целесообразно рассматривать одни сутки.

Обобщенная схема информационной технологии планирования применения МГ, реализующей эти процессы, приведена на рис. 1.

Основу модельно-алгоритмического обеспечения технологии планирования применения МГ составляют перечисленные выше модели функционирования МКА и МГ и три базовых алгоритма – планирования целевого применения МГ с НКУ и без НКУ, а также планирования операций информационного обмена в космической системе наблюдения.

На рис. 1 показано, что основным источником исходных данных для решения задач планирования является перечень заявок на выполнение съемок на горизонте планирования (как правило, это одни сутки), включающий состав и характеристики объектов наблюдения, а также требования к выполнению съемки, включая тип необходимой целевой аппаратуры, а также другие параметры: угол съемки, допустимый процент облачности и др. Кроме того, для решения задач планирования необходима информация о баллистической структуре МГ и технических характеристиках бортовых систем, участвующих в выполнении съемки, обмене данными с другими объектами МГ и хранении, при необходимости, специальной информации, полученной по результатам наблюдения.

В зависимости от того, осуществляется ли планирование с использованием НКУ или без него, задействуется одна из показанных на рис. 1 ветвей технологической схемы. При планировании с использованием НКУ осуществляется поиск планов целевого применения МКА на основе классических методов решения многокритериальной задачи оптимизации с применением элементов случайного поиска [6,11].

В качестве целевых функций используются показатели суммарной значимости обслуживаемых объектов наблюдения (ОН) с учетом коэффициентов важности ОН, условий съемки ОН, а также показатели энергопотребления МКА и надежности МГ. Основные временные ограничения учитывают окна времени видимости ОН и время, необходимое на переориентацию МКА между последовательными съемками [6]. В конкретных программно-алгоритмических реализациях может использоваться и другой состав целевых функций, определяемых требованиями к функционированию рассматриваемых МГ. Предложенный алгоритм планирования (см. рис. 1) отличается от существующих алгоритмов планирования возможностью обоснованного выбора плана применения высокоманевренных МКА с учетом полноты качественного обслуживания ОН, расхода системного энергоресурса и значений показателей надежности функционирования МКА, а также позволяет исследовать эффективность обслуживания заданного состава ОН для различных вариантов орбитального построения МГ, топологической структуры совокупности ОН с учетом обеспечения равномерности загрузки МКА МГ и равномерности расходования технического ресурса функциональными элементами системы управления движением каждого из МКА, привлеченных к обслуживанию ОН.

Для снятия критериальной неопределенности используется комбинированный метод, включающий построение результирующего интервального отношения предпочтения (метод уступок) и введение операторного решающего правила («правило нижней грани»), которое позволило свести многокритериальную задачу выбора планов

целевого применения МГ к двухкритериальной. В результате лицом, принимающим решения (ЛПР), формируется множество планов применения МГ МКА наблюдения, равномерно расположенных в области эффективных альтернатив (области компромиссов, области В. Парето).

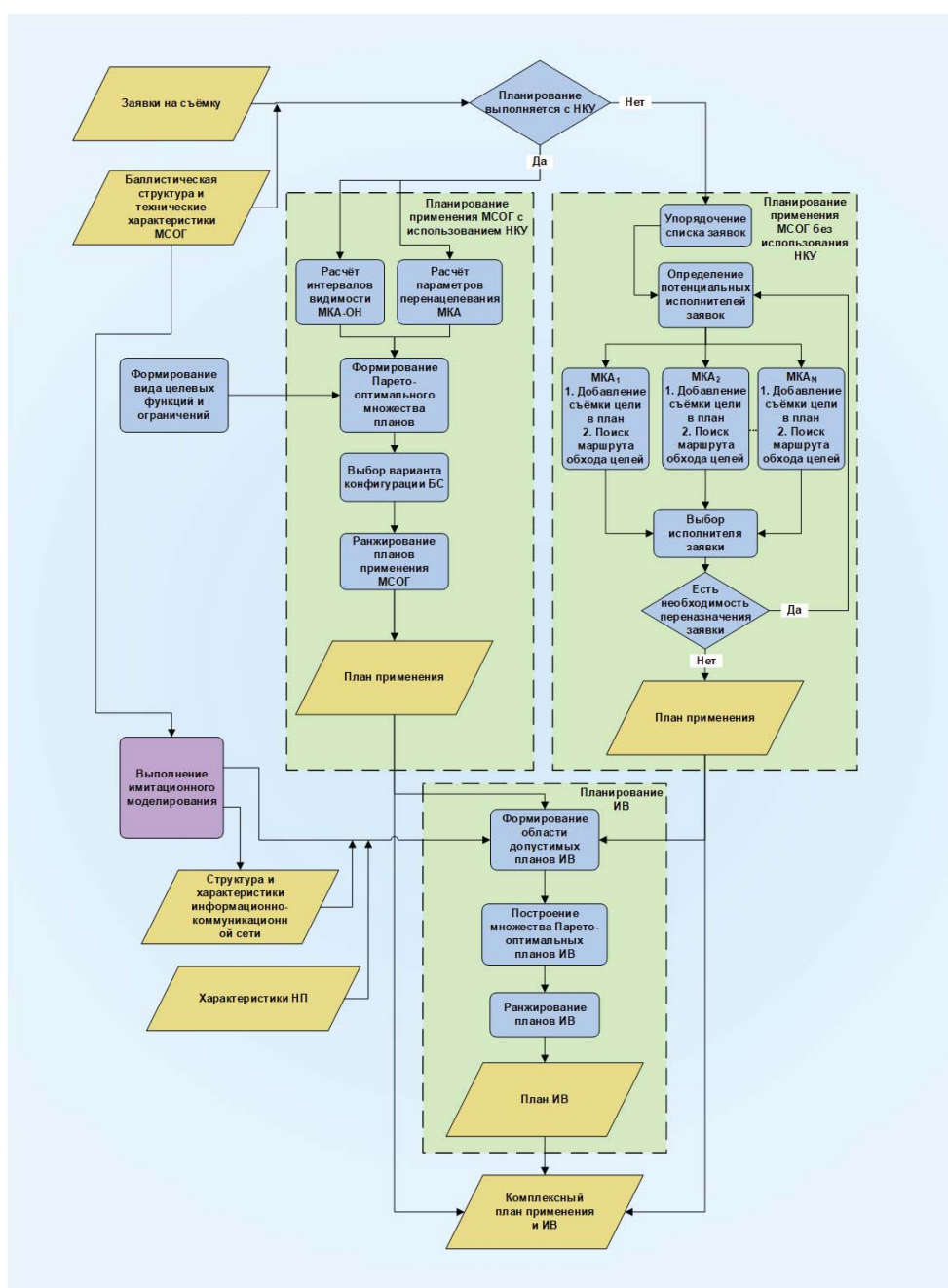


Рис. 1. Общая схема информационной технологии проактивного планирования и управления применением МГ МКА наблюдения (здесь N – общее число МКА в составе МГ)

Задачи планирования применения МКА наблюдения, входящих в состав МГ, без использования НКУ, относятся к классу задач распределенного (децентрализованного) и автономного управления, осуществляемого на базе ресурсов бортового комплекса управления (БКУ) МКА. Для решения задач данного класса к числу наиболее перспективных относятся методы, основанные на мультиагентных технологиях, о которых речь пойдет далее.

Информационная технология оперативного управления применением МГ МКА наблюдения

Как уже отмечалось, повышение эффективности функционирования системы управления МГ МКА наблюдения связано с необходимостью децентрализации управления применением МГ и задействованием для решения этой задачи ресурсов БКУ МКА из состава МГ. Формирование и коррекция планов съемки ОН для каждого МКА, расписаний задействования необходимых ресурсов бортовой аппаратуры в этом случае требуют применения методологии и технологий, основанных на моделях и алгоритмах автономного проактивного интеллектуального управления МГ наблюдения. Поскольку в данном случае рассматриваются ресурсы совокупности МКА, целесообразно говорить о технологиях автономного *группового* управления.

Автономное групповое управление (АГУ) применением МГ наблюдения предполагает решение совокупности взаимосвязанных подзадач, к основным из которых относятся задачи планирования и оперативного управления применением МГ наблюдения. Поэтому рассмотренные выше задачи децентрализованного планирования применения МГ рассматриваются как часть более общей задачи АГУ, решение которой основано на применении тех же методологических принципов комплексного моделирования и использования многоагентного подхода.

При этом под оперативным управлением применением будем понимать процессы оперативной коррекции либо изменения (перепланирования) первоначально синтезированного плана целевого применения МГ МКА.

Общая архитектура программного комплекса, используемого для АГУ применением МГ, соответствует структуре, представленной на рис 2, с аналогичным составом критериев, показателей и ограничений. Главные отличия связаны с расширением функциональных возможностей рассматриваемой здесь информационной технологии АГУ в двух направлениях:

- реализация не только пакетного режима управления, соответствующего планированию применения при заданном составе заявок на выполнение наблюдений (съемки ОН), но также инкрементального режима, означающего возможность перепланирования при появлении новых заявок или возникновении потребности в коррекции в процессе реализации ранее синтезированного плана;
- решение, одновременно с распределением между МКА заявок на съемку, также и задачи организации информационного обмена в космической системе наблюдения для доставки данных, соответствующих результатам съемки, потребителям.

Как и в описанной выше задаче децентрализованного планирования применения МГ, каждому МКА и НП сопоставляется программный агент, который координирует работу программных модулей своего МКА/НП и выполняет информационное взаимодействие с агентами других МКА/НП. Агент любого МКА/НП может быть как участником, так и инициатором информационных взаимодействий.

Основная цель информационных взаимодействий – согласованное принятие решений по распределению и перераспределению заявок на съемку целей (объектов наблюдения). Оценка возможности выполнения заявки каждым потенциальным исполнителем формируется на основе решения следующих задач построения: плана съемок ОН, плана доставки данных съемок в НП и плана полета.

Под планом полета подразумевается последовательность интервалов времени, в рамках которых МКА должен выполнять соответствующий режим полета.

Основой многоагентного подхода к разработке автономного группового управления МГ МКА является реализация возможности информационного взаимодействия моделей компонентов задачи АГУ МГ (программных агентов). В случае

наличия межспутниковой связи полагается, что программные агенты функционируют в бортовых вычислительных устройствах МКА и в НП и их информационное взаимодействие реализуется на основе межспутниковой связи с учетом возможных временных задержек передачи сообщений. В этом случае управление МКА может происходить в режиме реального времени. При отсутствии межспутниковой связи программные агенты функционируют в локальной сети наземного пункта. В этом случае планирование выполнения заявок осуществляется с учетом плана установления связи НП с МКА, агенты МКА могут рассматриваться в качестве «цифровых двойников» МКА. Предполагалось, что баллистическая орбитальная структура МГ МКА ДЗЗ включает в себя несколько плоскостей орбит МКА. При этом МКА в каждой плоскости образуют кластеры МКА, включающие в себя ведущий МКА (лидер) кластера и ведомые МКА, расположенные друг относительно друга на относительно небольших расстояниях (несколько сотен километров), что позволяет обеспечивать гарантированный межспутниковый обмен информацией.

Проведенный анализ задач второго этапа – *оперативного управления применением* МГ – показал, что их решение требует разработки ИТ, основанной на моделях и алгоритмах автономного проактивного интеллектуального группового управления (АГУ) МГ наблюдения. При этом под оперативным управлением применением понимаются процессы коррекции либо изменения (перепланирования) первоначально синтезированного плана целевого применения МГ МКА.

Решение общей задачи АГУ основано на применении тех же методологических принципов, что и для рассмотренных выше задач децентрализованного планирования. Главные отличия связаны с расширением функциональных возможностей ИТ АГУ в двух направлениях: 1) реализация инкрементального режима управления, означающего возможность перепланирования при появлении новых заявок или возникновении потребности в коррекции ранее синтезированного плана; 2) решение, одновременно с распределением заявок на съемку, также и задачи организации информационного обмена и доставки результатов съемок потребителям при наличии или отсутствии межспутниковых линий связи [10]. На рис. 3 представлена структура разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО), реализующего предложенную ИТ оперативного управления (АГУ) применением МГ МКА наблюдения.

Кратко остановимся на основных функциях, реализуемых программными модулями, входящими в состав СМАО.

Manager

Данный модуль обеспечивает решение следующих задач:

- получение событий из движка моделирования и инициирование соответствующего сценария поведения обработки этого события;
- сообщение движку моделирования об окончании обработки полученного события и передача ему сгенерированных новых событий;
- оркестровка выполнения методов функциональных модулей в процессе обработки полученных событий.

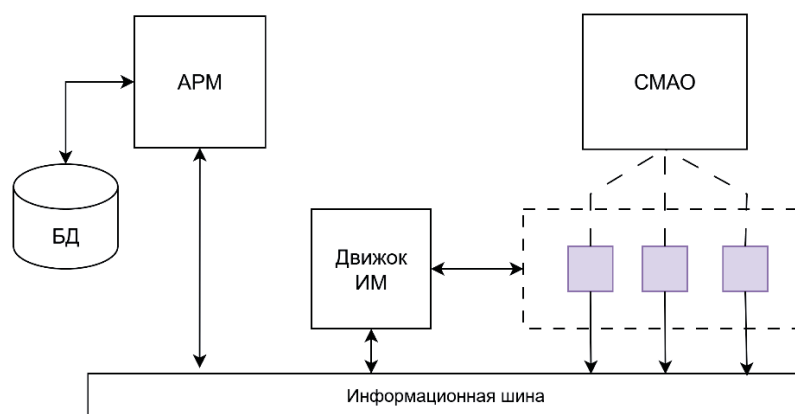


Рис. 2. Архитектура программного комплекса АГУ МГ МКА

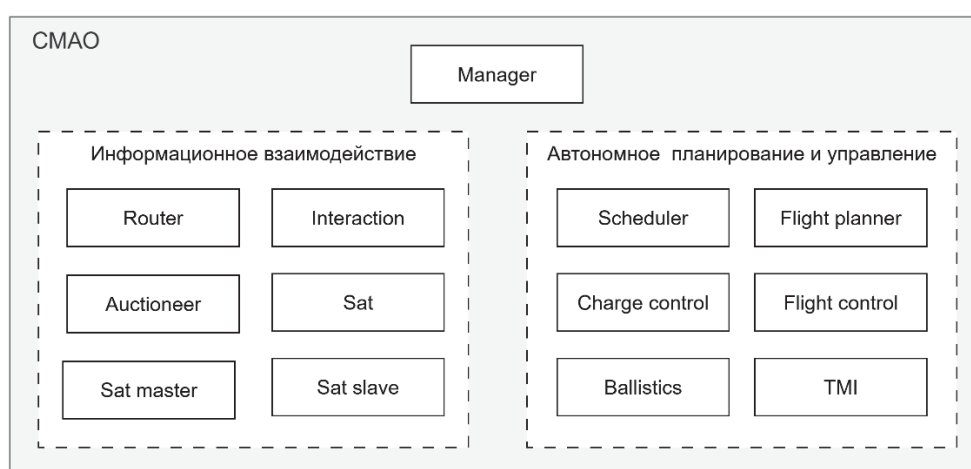


Рис. 3. Обобщенная структура СМАО АГУ МГ МКА

Auctioneer

Этот модуль описывает модель поведения инициатора протокола распределения заявки. Инициатором протокола может быть агент любой сущности: лидера кластера, ведомого кластера и НП. В процессе выполнения этой роли решаются следующие задачи:

- управление порядком распределения заявок;
- определение (с помощью модуля Ballistics) списка МКА, имеющих видимость цели распределяемой заявки на горизонте времени моделирования;
- выбор исполнителя заявки на основе сравнительного анализа предложений агентов всех МКА, имеющих видимость цели;
- сохранение в памяти невыполнимых заявок и перераспределение их агентам лидеров других кластеров при формировании полностью связанной сети межспутниковой связи.

Sat

Этот модуль описывает модель поведения агента ведомого МКА кластера в роли потенциального исполнителя заявки. В ходе выполнения этой роли решаются две задачи:

- оценка возможности выполнения съемки по новой заявке и формирование предложения по ее выполнению;
- уточнение плана съемок и плана полета при назначении новой заявки.

Решение данных задач выполняется с использованием модулей из второй группы по следующему сценарию:

- 1) с помощью модуля **Ballistics** рассчитывается окно времени и углы видимости цели;
- 2) с помощью модуля **Scheduler** выполняется поиск допустимой коррекции текущего рабочего плана съемок, позволяющего добавление в него съемки новой цели;
- 3) на основании найденной допустимой коррекции плана съемок с помощью модуля **Flight planner** выполняется коррекция плана полета;
- 4) на основании скорректированного плана полета с помощью модуля **Charge control** выполняется расчет прогноза заряда аккумуляторной батареи (АКБ) каждого МКА;
- 5) если на горизонте времени моделирования прогноз заряда остается выше минимального допустимого уровня, заявка полагается выполнимой. В том случае, если назначение новой заявки повлекло отмену выполнения ранее назначенной заявки, ее перераспределение выполняется с помощью модуля **Auctioneer**. В случае неуспешного перераспределения заявка возвращается лидеру кластера.

Interaction

В этом модуле описывается модель поведения агентов лидеров кластеров, обеспечивающее поиск вариантов перераспределения данных съемок с целью сокращения времени их доставки на Землю. Выполнение протокола предполагает ограниченное количество итераций поиска. На каждой итерации агент лидера выбранного кластера является мастером итерации. Если в процессе выполнения итерации найден и согласован вариант передачи части данных лидеру другого кластера, с помощью модулей **Sat master** и **Sat slave** определяется и согласовывается порядок передачи данных МКА кластера.

Sat master

В этом модуле описывается модель поведения агента лидера кластера в части информационного взаимодействия с агентами ведомых МКА кластера, целью которого является:

- поддержание актуальных данных о наличии объемов данных в памяти ведомых МКА кластера, получаемых при выполнении запланированных съемок;
- получение и сохранение в памяти заявок, невыполнимых ведомыми МКА кластера;
- согласование порядка передачи данных в сеансах связи с НП и по межспутниковой связи в соответствии со схемой протокола взаимодействия.

Sat slave

В этом модуле описывается модель поведения агента ведомого МКА в части его информационного взаимодействия с лидером кластера, целью которого является:

- возврат агенту лидеру кластера заявок после отмены съемок соответствующих целей и невозможности их перераспределения другим ведомым кластера,
- извещение агента лидера кластера о полученных данных в результате выполнения съемок целей;
- расчет времени и объема данных для передачи в рамках доступного времени связи с НП и/или межспутниковой связи.

Возможность передачи данных в рамках доступного времени связи определяется с помощью модуля **Flight control**. Если в текущий момент времени выполняется режим полета съемки цели, передача данных невозможна.

Группа функциональных модулей «Автономное планирование и управление».

Scheduler

В этом модуле описывается программная реализация алгоритма поиска допустимой коррекции текущего рабочего плана съемок при добавлении в него съемки цели по новой заявке.

Ballistics

В этом модуле описывается алгоритм расчета окон времени и углов видимости цели для заданного списка МКА на заданном горизонте времени на основе моделирования полета МКА.

Flight planner

В этом модуле описывается алгоритм формирования начального плана полета и/или его коррекции в случае назначения новых заявок и соответствующего изменения текущего рабочего плана съемок.

Формирование начального плана полета выполняется с учетом времени нахождения МКА на освещенных и теневых сторонах орбиты и плана сеансов связи МКА с НП. Время нахождения на освещенных и теневых сторонах орбиты выполняется до запуска эксперимента на основе моделирования полета с помощью внешнего модуля моделирования полета МКА Pro 42. План сеансов связи с НП является составной частью исходных данных, передаваемых агенту МКА при его инициализации.

Charge control

В этом модуле описывается алгоритм расчета прогноза уровня заряда АКБ при формировании и изменении плана полета и расчета фактического уровня заряда АКБ после окончания каждого режима полета. Исходными данными для этих расчетов являются модельные и оперативные данные.

Модельными данными являются оценки потребления заряда АКБ устройствами МКА. Эти данные передаются агенту МКА при его инициализации. Оперативными данными являются план полета и фактическое время, потраченное МКА на передачу данных в НП и/или по межспутниковой связи. В модуле ***Flight control*** в процессе моделирования определяется время передачи данных для текущего режима полета.

Flight control

В этом модуле описывается модель имитации управления полетом МКА, в которой предусматривается реализация следующих правил и положений. Основой управления является текущий рабочий план полета, сформированный в модуле ***Flight control***. В соответствии с планом полета в запланированные моменты времени происходит смена режима полета. В зависимости от нового режима полета устройствам и системам МКА выдаются соответствующие целеуказания.

Если в следующем слоте времени плана полета МКА находится на освещенной стороне орбиты и запланирован заряд АКБ, выдается целеуказание на ориентацию солнечных панелей на Солнце.

Если в следующем слоте времени запланирована съемка цели, выдается целеуказание на выполнение программного разворота на запланированные углы крена и тангажа к заданному моменту времени.

Если в следующем слоте времени запланирован сеанс связи с НП, выдается целеуказание на выполнение соответствующего программного разворота корпуса МКА и ориентацию антенн на пункт приема данных. Если МКА является лидером кластера, ему выдается указание на информационное взаимодействие с агентами ведомых МКА кластера на согласование времени и порядка передачи данных.

В рамках созданного экспериментального образца программного комплекса (ЭО ПК) предполагается, что межспутниковая связь выполняется с помощью фазированных антенных решеток (ФАР). В этом случае не требуется программный разворот корпуса

МКА, но установление связи становится возможным при минимально допустимой скорости углового вращения. Как следствие, установление межспутниковой связи рассматривается в качестве режима функционирования, который может выполняться в определенных режимах полета. В соответствии с этим время установления межспутниковой связи и предполагаемые текущие координаты нахождения другого МКА, с кем устанавливается связь, рассматриваются в качестве дополнительных параметров к плану полета, которые в запланированные моменты времени передаются системе управления ФАР. В данном случае такими моментами времени являются моменты времени появления полностью связанной сети межспутниковой связи.

Наряду с выдачей целеуказаний на выполнение следующего режима полета на основе телеметрических данных выполняется анализ фактического состояния МКА, в частности, определение фактического уровня заряда АКБ. В рамках имитационной модели фактический уровень заряда на момент окончания режима полета может отличаться от прогнозного, если во время этого режима полета выполнялась передача данных в НП и/или по межспутниковой связи. В соответствии с этим в ходе моделирования этого режима полета в модуле *Flight control* выполняется регистрация времени, потраченного на передачу данных, и с помощью модуля *Charge control* выполняется расчет фактического заряда АКБ на текущий момент времени, с учетом которого выполняется коррекция прогноза заряда.

ТМІ

Модуль, в состав которого входит модель обученной гибридной нейронной сети, позволяет на основе анализа телеметрических данных классифицировать текущее состояние МКА как штатное или нештатное. На основе этих данных принимается решение об использовании конкретного МКА для выполнения задач по целевому предназначению.

Пример реализации ИТ управления применением МГ наблюдения

Рассмотренная ИТ проактивного планирования и АГУ применением МГ в настоящее время реализована в экспериментальном образце программного комплекса (ЭО ПК), разработанного для проведения исследовательских испытаний. Внешний вид интерфейса пользователя ЭО ПК показан на рис. 4. С помощью данного интерфейса осуществляется ввод исходных данных (ИД), прорисовка трасс МКА, запуск решения задач планирования и АГУ, а также вывод промежуточных и финальных результатов. В составе ИД вводятся координаты НП, заявки на съемку (координаты ОН), приоритеты (степени важности ОН), модели МКА, данные для расчета баллистической структуры, тип организации связи и др.

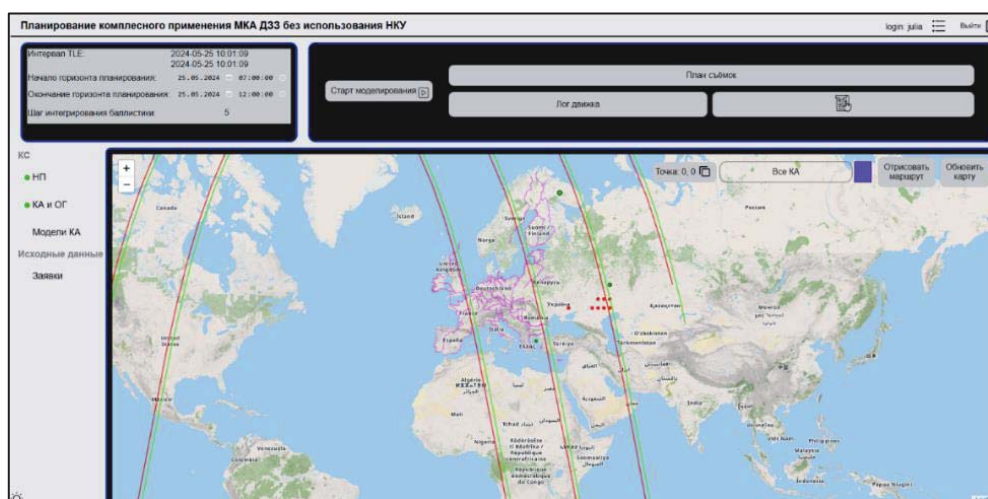


Рис. 4. Вид интерфейса пользователя ЭО ПК

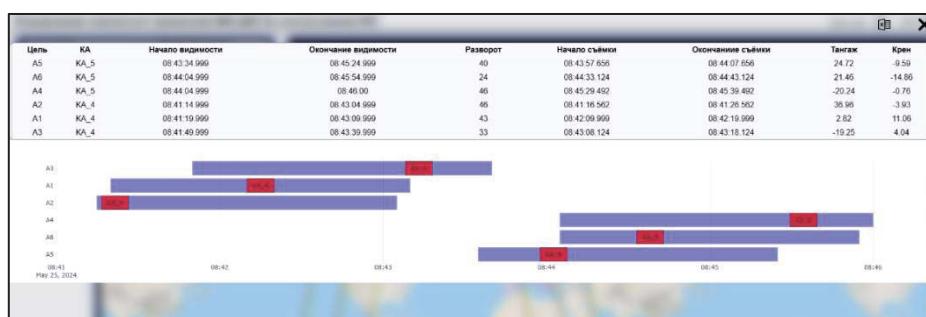


Рис. 5. Пример вывода расписания съемок ОН

Пример вывода результатов решения задачи планирования приведен на рис. 5, где показаны значения окон видимости и рассчитанных границ интервалов съемки заданных ОН, а также углы разворота, тангажа и крена МКА при проведении съемок. Кроме того, выводятся значения показателей качества планирования и другие параметры, определяемые конкретной задачей управления применением МГ.

Заключение

Разработанная ИТ проактивного управления применением МГ МКА наблюдения, основанная на методологии системного моделирования функционирования МГ наблюдения и комплексном применении алгоритмов многокритериальной оптимизации и многоагентных технологий позволяет совместно решать задачи централизованного (с НКУ) и децентрализованного (без НКУ) планирования и оперативного управления целевым применением высокоманевренных МКА различного назначения в структуре МГ, включая задачи доставки результатов съемки потребителям. В состав разработанного полимодельного комплекса вошли аналитико-имитационные логико-динамические модели управления МГ МКА и НКУ, нейросетевые модели оценивания и прогнозирования состояния бортовой аппаратуры МКА и агентно-ориентированные модели АГУ МКА. В частности, аналитическая часть перечисленных моделей представлена моделями и алгоритмами расчета времени возможного установления межспутниковой связи, времени выполнения программных разворотов МКА, времени заряда (разряда) аккумуляторных батарей МКА.

В целом аналитико-имитационное, а также агентно-нейросетевое моделирование процессов проактивного управления полетом МКА, обеспечивающее описание выполнения как динамически обновляемого плана съемок, так и контроля состояния

бортовой аппаратуры каждого МКА в отдельности, является конкретной реализацией предложенного варианта комплексирования классических подходов к формальному описанию процессов управления МКА, нейросетевых технологий, а также моделей и методов искусственного интеллекта при АГУ МГ МКА наблюдения земной поверхности [9-14].

Проводимые экспериментальные исследования показывают возможность существенного повышения эффективности процесса планирования применения МГ, состоящих из нескольких десятков МКА наблюдения. Применение разработанных информационных технологий обеспечивает повышение эффективности процесса планирования применения и АГУ многоспутниковой орбитальной группировки МКА наблюдения. Так, например, целевой выигрыш в эффективности планирования при применении разработанной технологии состоит в увеличении пропускной способности (производительности) МГ не менее чем на 10-15%.

Кроме того, использование технологии обеспечивает получение дополнительных положительных эффектов: снижение числа субъективных ошибок благодаря высокой степени автоматизации процессов планирования применения МГ; возможность проведения сравнительного анализа решений многокритериальных задач планирования и количественного оценивания потерь и выигрышей в значениях показателей эффективности функционирования МГ при переходе от одного плана к другому из области Парето-оптимальных решений.

Поддержка исследований

Исследования, выполненные по представленной тематике, проводились за счет госбюджетной НИР FFZF-2025-0020.

Литература

1. <https://brycetechnology.com/reports>
2. **Chen H., Peng S., Du C., Li J.** Earth Observation Satellites. Task planning and scheduling // Springer, Singapore. 2023. 189 p.
3. **Ferrari B., Cordeau J. F., Delorme M., Iori M., Orosei R.** Satellite Scheduling Problems: a Survey of Applications in Earth and Outer Space Observation. Computers & Operations Research. 2024. February.
4. **Балухто А.Н., Хартов В.В., Романов А.А., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В. и др.** Искусственный интеллект в космической технике. Состояние. Перспективы применения / Под ред. докт. техн. наук А.Н. Балухто. (Монография). – М.: Радиотехника, 2021. 434 с.
5. Искусственный интеллект в военно-космической деятельности. Монография / Под ред. М.М. Пенькова, И.В. Сахно, А.В. Назарова. – СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2022. 501 с
6. **Гордеев А.В.** Многокритериальное планирование многоспутниковой орбитальной группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при обслуживании групповой наземной цели // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2023: Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности / Под науч. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 580-590.
7. **Занин К.А., Клименко Н.Н.** Применение космических аппаратов двойного назначения для решения военных задач. Часть 1. Космические аппараты оптико-электронного наблюдения нового поколения компаний Planet и Blacksky // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4(62). С. 20-28.

8. **Зеленцов В.А.** Основные тенденции развития и планирования применения малых космических аппаратов и многоспутниковых орбитальных группировок наблюдения. Часть 1 // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 12. С. 16-28.
9. **Асоскова Ю.В. и др.** Децентрализованное автономное управление многоспутниковой космической системой дистанционного зондирования земли // Космонавтика и ракетостроение. 2024. № 3(136). С. 126-141.
10. **Карсаев О.В.** Автономное планирование задач наблюдения в группировках спутников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1(203). С. 129-143.
11. Модель планирования выполнения комплекса операций обработки информации в неоднородной распределенной системе с учетом многорежимности ее функционирования / Е. Н. Алешин, А. Н. Павлов, Д. А. Павлов, А. Б. Умаров // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 13-20.
12. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН. 2018. 314 с.
13. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
14. <http://litsam.ru>.