

О.В. КАРСАЕВ  
**ОБЗОР ТРАДИЦИОННЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ПЛАНИРОВАНИЯ МИССИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

---

*Карсаев О.В. Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов*

**Аннотация.** В статье выполняется обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий космических аппаратов, выполняющих задачи наблюдения целевых объектов на Земле и/или в космическом пространстве. В традиционных системах планирования космические аппараты выполняют планы, рассчитанные на Земле. В таком случае возникает ряд объективных недостатков, которые могут существенно ограничивать эффективность использования космических аппаратов и их ресурсов. В статье приводится описание и анализ таких недостатков. Наличие таких недостатков и новые постановки задач, возникающие в связи с тенденцией использования малых космических аппаратов, являются основными причинами развития инновационных методов и систем планирования. Инновационные методы и системы планирования главным образом предполагают развитие двух основных возможностей: автономное адаптивное планирование на борту космических аппаратов и информационное взаимодействие между ними. Развитие второй возможности рассматривается как основа для обеспечения адаптивного группового поведения космических аппаратов.

В обзоре рассматриваются примеры инновационных систем планирования, которые либо уже используются в экспериментальных режимах в текущих миссиях, либо находятся на стадии исследований, на уровне компьютерного моделирования. Статья также содержит обзор нескольких перспективных решений в области связи между космическими аппаратами, так как возможность использования таких решений оказывает существенное влияние на постановку задачи планирования миссий космических аппаратов.

**Ключевые слова:** автономное планирование, информационное взаимодействие, групповое поведение.

---

**1. Введение.** В данной статье выполняется обзор работ, позволяющий проиллюстрировать текущее состояние и актуальные направления исследований в области планирования миссий космических аппаратов (КА), выполняющих задачи наблюдения целевых объектов на Земле и/или в космическом пространстве. Под планированием миссий КА подразумевается планирование целевых задач, выполняемых с помощью специальной аппаратуры КА.

Основными источниками являются труды следующих наиболее рейтинговых международных конференций и семинаров. Конференция *International Conference on Space Operations* — очередная, 13-ая по счету, конференция состоится в 2016 году. Конференция *Conference on Small Satellites* признается международным сообществом одной из ведущих конференций по малым КА. Она проводится ежегодно, начиная с 1987 года. В 2015 году состоялась 29-ая по счету конференция. Се-

минар *International Workshop on Planning and Scheduling for Space*. 9-ый по счету семинар прошел в 2015 году. *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation for Space*. 12-ый по счету симпозиум прошел в 2014 году.

В обзоре рассматриваются традиционные (существующие и используемые в реальной практике) системы планирования миссий КА и инновационные системы, различие между которыми кратко можно охарактеризовать следующими основными свойствами. В традиционных системах планирование выполняется в наземных комплексах управления (НКУ). Сформированные планы выполнения целевых задач передаются КА, а бортовые комплексы управления (БКУ) КА обеспечивают только выполнение этих планов операций. В инновационных системах планирования БКУ КА уже рассматриваются не только как системы исполнения полученных команд, а также используются для автономного планирования и обработки полученных результатов наблюдений. Это обеспечивает существенное повышение эффективности целевого функционирования КА за счет использования таких возможностей, как распределение или перераспределение целей наблюдения между КА и планирование операций с учетом текущего фактического состояния КА, оперативная коррекция планов операций при появлении новых задач в результате обработки полученных результатов наблюдений и других дополнительных возможностей.

Круг организаций (научных, коммерческих, государственных, военных и др.), заинтересованных в развитии космических исследований, крайне широк. По понятным причинам особую заинтересованность в этих исследованиях имеют различные военные организации и ведомства. В связи с этим следует отметить, что в 2007 году конгрессом США был образован офис для управления программой «*Оперативно реагирующий космос*» (*Operationally Responsive Space*), основной целью которой является обеспечение и координация космических исследований в интересах Министерства обороны США. Общую информацию об этой программе можно найти в статье [1]. В этой статье приводится общее описание организации исследований, а также ретроспективное описание выполненных миссий программы (ORS 1, 2, 3 и 4) и задачи новой миссии ORS-5. В рамках этой миссии в 2017 году планируется запуск группировки малых КА, которые будут обеспечивать решение таких задач, как: тактическая круглосуточная разведка, сбор информации и распознавание целей, радиолокационные наблюдения, обнаружение пуска ракет и обеспечение связи. Разработка решений в области планирования и управления орбитальными группи-

ровками (ОГ) малых КА также является одним из основных направлений исследований в данной программе.

Обзор имеет следующую структуру. В первой части обзора приводится краткое описание традиционных решений. Инновационные решения сгруппированы в рамках трех направлений: автономное планирование, связь и информационное взаимодействие между КА, которые описываются в последующих трех частях обзора. Обзор исследований в области развития связи между КА необходим, так как новые виды и решения организации связи оказывают критически важное влияние на постановку и содержание задач планирования.

**2. Традиционное планирование.** К настоящему времени существует достаточно много систем планирования, реализующих традиционный подход и используемых на практике для управления различными миссиями. Обзор таких систем (*APSI*, *ASPEN*, *EUROPA*, *flexplan* и других — всего 14) можно найти в работе [2]. В данной работе на примере этих систем приводится обобщенное описание задач и процессов планирования. В рамках этого обобщенного описания содержательный контекст задач представляется в виде совокупности моделей, описывающих свойства и ограничения отдельных элементов и понятий космических систем и КА. Планирование в целом сводится к моделированию процессов и сценариев поведения элементов системы, и целевое функционирование КА при этом представляется в виде множества временных графиков состояния элементов системы, взаимосвязанных между собой. На промежуточных этапах планирования эти графики используются для выявления и устранения конфликтов и нарушений ограничений, а также для оптимизации финального плана выполнения полученных заявок, и рассматриваются в виде основополагающих конструкций систем планирования. В связи с этим в работе основное внимание уделяется анализу и описанию математических моделей и методов, используемых для описания этих конструкций. Краткое описание каждой из систем планирования в работе [2] рассматривается в виде сопоставления с обобщенным описанием задач и процессов планирования.

В качестве примера для иллюстрации и пояснения такого обобщенного представления задач и процессов планирования можно использовать систему планирования *CPAW (Collection Planning & Analysis Workstation)* [3]. Эта система разработана в компании *Orbit Logic* (США). Она используется для планирования различных миссий наблюдения за целевыми объектами на Земле и в космическом пространстве и, в частности, для планирования миссий в интересах военных ведомств США. Система предназначена для планирования функционирования нескольких КА и проведения съемок целевых объ-

ектов с помощью различных средств наблюдения: оптико-электронных, радиоэлектронных, инфракрасных средств наблюдения, радаров с синтезированной апертурой и др.

Контекст задачи планирования в этой системе описывается с помощью совокупности следующих моделей и временных графиков:

- модели камер и моделирование процессов съемки;
- модели КА и моделирование вращений и нацеливания КА;
- модели солнечных батарей и моделирование процессов генерации и потребления электроэнергии;
- модели памяти и моделирование процессов использования памяти и сеансов связи передачи данных наблюдений на Землю;
- модели и моделирование условий освещенности целей в рамках возможных временных интервалов проведения съемок;
- модели и моделирование технологических ограничений и условий использования камер, определяющих необходимые интервалы времени между проведением съемок;
- модели антенн и моделирование процессов передачи данных, моделирование возможностей проведения съемок во время передачи данных на Землю;
- модели и моделирование условий облачного покрова над целевыми районами наблюдений в рамках возможных временных интервалов проведения съемок.

Системы планирования могут разрабатываться для планирования какой-то одной конкретной миссии или различных миссий с учетом различий и специфики разнообразных КА. Преимущества и недостатки таких подходов рассматриваются в работе [4]. Система CPAW разрабатывалась в рамках второго подхода, т.е. предполагается, что она может использоваться для планирования различных миссий и различных КА. В связи с этим в работе [3] кроме достаточно детального описания перечисленных выше моделей также приводится описание возможностей их настройки на специфику различных КА.

Процесс планирования в системе CPAW предполагает решение следующей совокупности задач.

*Регистрация заявок.* Эта задача включает описание координат целей, а также описание условий и ограничений проведения съемки: допустимые углы разворота КА/камеры, условия освещенности и облачности и др.

*Планирование сеансов связи.* Планирование сеансов связей выполняется при наличии большого количества КА и наземных станций, когда для наземных станций в одно и то же время существует несколько временных окон видимости разных КА.

*Определение горизонта планирования.* Выполняется с использованием нескольких различных подходов. В простейшем случае горизонт планирования определяется на основе рассчитанного плана сеансов связей, как интервал времени между двумя последующими сеансами связи. Для разных КА могут выбираться различные горизонты времени планирования.

*Фильтрация заявок и целей.* Предполагает выбор целей для планирования съемок в выбранном горизонте времени. В рамках фильтрации первоначально выполняется разбиение больших целевых областей на несколько полос. Съемки полос рассматриваются в виде отдельных целей планирования и могут планироваться в разных горизонтах времени планирования. Выбор целей для планирования в заданном горизонте времени выполняется с учетом различных факторов: приоритеты целей, условия съемки, и др.

*Планирование съемок целей наблюдения и передачи данных на Землю.* Исходными данными для этой задачи являются: горизонт времени планирования КА, план сеансов связей КА и множество целей, выбранных в результате фильтрации и назначенных данному КА. Планирование съемок выполняется совместно с планированием использования памяти КА для регистрации результатов съемок и передачи этих результатов на Землю. Результат решения данной задачи транслируется в план целеуказаний, и передается на борт спутника.

*Контроль выполнения съемок.* Используется для выявления необходимости повторного планирования съемок целей, которые могут возникать либо после обработки полученных результатов съемок, либо после неуспешных сеансов связей передачи целеуказаний КА. При контроле выполнения съемок учитывается обстоятельство того, что полосы съемки, определенные для выполнения одной заявки, могут также являться частью выполнения других заявок.

Планирование работы нескольких КА выполняется с учетом координации планов различных КА. Целью координации, в частности, является избегание дублирования съемок одних и тех же и/или пересекающихся целей, согласование съемок отдельных полос территориальных целей разными КА, а также распределение целей между КА с учетом анализа факторов, обеспечивающих получение данных с различным уровнем качества. Планирование в системе может выполняться как с участием операторов, так и в полностью автоматическом режиме.

Наряду с обзором систем планирования в данном разделе далее рассматривается ряд отдельных важных аспектов, оказывающих существенное влияние на эффективность решения и/или на постановку задач планирования целевого функционирования КА.

*Инкрементальность планирования.* В традиционных системах планирование может выполняться в двух режимах: в пакетном режиме и в инкрементальном режиме. В пакетном режиме планирование выполняется несколько раз, как правило, два раза в сутки. Предметом планирования являются три группы заявок: 1) новые заявки; 2) заявки, не включенные ранее в планы и переданные на борт КА; 3) заявки, включенные в эти планы, но по которым получены факты их невыполнения. В инкрементальном режиме планирование выполняется непрерывно. В ходе него выполняется либо оптимизация текущего варианта плана, либо его модификация по мере поступления новых заявок или фактов невыполнения запланированных ранее заявок, а также по мере возникновения других непредвиденных событий, требующих уточнения текущего варианта плана. В системах, используемых на практике, планирование, как правило, выполняется в пакетном режиме. Недостатки пакетного режима и преимущества инкрементального режима планирования достаточно подробно рассматриваются в работе [5]. В обобщенном виде сравнительный анализ результатов планирования, описанный в этой работе, можно сформулировать следующим образом. В случае пакетного режима имеющийся в текущий момент времени план не учитывает новую информацию, которая стала известной после окончания последней сессии планирования. При этом имеющийся план уже может быть недопустимым. Например, если появилась дополнительная информация об отмене запланированного сеанса связи для передачи целеуказаний. Базовой характеристикой этого режима также является то обстоятельство, что в каждой сессии планирование выполняется «с нуля», и не учитываются те результаты планирования, которые уже были получены в ходе предыдущей сессии планирования, в частности, варианты разрешения выявленных конфликтов. При каждой последующей сессии планирования поиск вариантов разрешения уже известных конфликтов происходит заново, но уже с учетом новой информации и разрешения новых выявленных конфликтов. В случае инкрементального режима полагается, что в каждый момент времени текущий вариант плана является допустимым и учитывает всю известную к этому времени информацию.

В этой работе [5] также приводится описание системы инкрементального планирования, которая разрабатывается в Немецком центре космических операций начиная с 2014 года.

*Надежность планирования и управления.* Задача обеспечения надежности планирования и управления, а также описание подхода к ее решению детально рассматривается в работе [6]. Содержание задачи состоит в следующем. Пусть  $t_1$  и  $t_2$  моменты времени начала двух сеансов связей,  $t_1$  — последнего прошедшего, а  $t_2$  — предстоящего сеан-

са. Предполагается, что планирование выполняется в инкрементальном режиме. Текущий вариант плана называется *мастер планом*. Фрагмент этого плана, переданный на борт КА в ходе последнего сеанса связи, называется *исполняемым фрагментом плана*. Фрагмент исполняемого плана, как правило, рассчитывается на период времени  $t1-t2$ . После передачи исполняемого фрагмента плана при продолжении планирования изменения в мастер плане возможны начиная с момента времени  $t2$ . Таким образом, поддерживается синхронизация планирования и управления КА во времени. При неуспешном сеансе связи синхронизация нарушается, так как мастер план содержит фрагмент исполняемого плана, не переданный на КА. В этом случае при продолжении планирования мастер план по-прежнему может корректироваться, начиная с момента времени следующего сеанса связи. Но при этом требуется повторное планирование тех операций, которые были включены во фрагмент исполняемого плана, передача которого оказалась неуспешной. В такой ситуации критически важным фактором становится период времени до следующего сеанса связи с КА. Он может оказаться относительно малым, недостаточным для перепланирования мастер плана и полного восстановления синхронизации. Последовательность сеансов связей, между которыми интервалы времени малы и могут возникать такие ситуации, в статье называется *сессией сеансов связей*. Проблема обеспечения надежности управления главным образом связывается с такими сессиями сеансов связей. При этом сложность этой проблемы существенно вырастает, если планирование выполняется для нескольких КА.

Для обеспечения надежности планирования в этой статье [6] предлагается подход, в котором, исходя из реальной ситуации, на ближайшей период времени определяются все возможные сценарии развития ситуации. Они определяются всеми возможными комбинациями неуспешных сеансов связей, и для каждого возможного сценария рассчитывается соответствующий мастер план. Такой подход требует значительных вычислительных мощностей, так как возможны ситуации, когда необходимо рассчитывать десятки вариантов мастер плана. Поэтому в статье также рассматривается обоснование возможных допущений для снижения числа рассчитываемых мастер планов.

*Наземная инфраструктура.* Оперативность управления и получения данных съемок определяется количеством и расположением наземных станций приема информации с КА. В связи с этим следует отметить направления исследований по разработке малых и недорогих наземных станций приема информации. В частности, в работе [7] приводится описание портативной переносной наземной станции, разра-

ботанной в интересах программы «Оперативно реагирующий космос». Эта станция может быть развернута в требуемой позиции в течение дня двумя специалистами. Такая же тенденция рассматривается в работе [8], в которой описывается разработка системы сбора метеоданных для составления более точного прогноза погоды. Одним из главных требований в этой системе является обеспечение периодичности (менее часа) сбора данных в различных точках земной поверхности. Для обеспечения этого требования на основе результатов компьютерного моделирования обоснована необходимость формирования системы, состоящей из 100+ наноспутников и 50+ наземных станций. Ввиду большого количества наземные станции проектируются по аналогии с малыми КА, т.е. как малые и недорогие.

*Стандартизация информационных процессов планирования и управления.* Краткое описание существующих и разрабатываемых стандартов, а также описание сервисов, реализующих эти стандарты, можно найти в работе [9]. Содержательная задача, на примере решения которой в этой работе демонстрируются целесообразность и преимущества таких стандартов и сервисов, в общем виде заключается в следующем. Имеется множество КА, на которых используются различные типы сенсоров. Для управления КА и приема информации с КА используется множество различных наземных станций. Основной целью стандартизации в этом контексте является предоставление заказчикам и потребителям информации КА единого веб-приложения, с помощью которого они могли бы взаимодействовать с различными операторами КА и выбирать наилучшие варианты выполнения своих заявок.

В силу объективных обстоятельств традиционный подход к управлению КА обладает известными объективными недостатками. Основными являются следующие три группы недостатков:

1) Наземное планирование выполняется на основе прогнозирования потребления и восстановления ресурсов КА. В частности, на основе прогнозирования потребления и восстановления энергии и памяти регистрации результатов съемки целевых объектов. Для того чтобы гарантировать выполнимость планируемых операций, необходимо использовать оценки потребления этих ресурсов с определенным запасом. Например, в работе [10] при моделировании потребления свободной памяти для записи данных съемок используются оценки с четырехкратным запасом. Очевидно, что такой подход априори не позволяет использовать возможности КА наилучшим образом, так как в результате выполнения таких планов в реальности возникают проблемы в использовании сенсоров КА.

2) Традиционный подход предполагает, что основой для управления является наземный план операций, фрагмент которого на ближайший горизонт времени передается на борт спутника в виде командных целеуказаний. В связи с этим в работах [5] и [6] рассматриваются соответственно проблемы инкрементальности и робастности планирования. Инкрементальность, по сути, означает постоянное изменение текущего плана в режиме реального времени в связи со всеми возникающими событиями. Однако в рамках традиционного подхода инкрементальность планирования может быть обеспечена лишь частично, так как информация о событиях, возникающих на борту КА (в частности, фактические данные о выполнении целеуказаний), становится известной с существенным запазданием. Робастность планирования, по сути, должна обеспечивать своевременный расчет и передачу на борт КА оптимального плана целеуказаний с учетом всех исходных данных, известных к текущему моменту времени. Однако при традиционном подходе робастность планирования также может быть обеспечена лишь частично, так как уровень робастности определяется уровнем инкрементальности планирования.

3) Традиционный подход предполагает, что генерация целей и задач наблюдения и формирование исходных данных для планирования выполняется на Земле. Однако потребности в проведении дополнительных съемок целей или съемок новых целей могут генерироваться на борту КА в результате обработки и анализа уже проведенных наблюдений. Очевидно, что в рамках традиционного подхода реакция на возникновение таких потребностей может оказаться слишком запоздалой и не обеспечивать получение необходимых результатов.

На основании перечисленных недостатков эксперты компании SSTL Ltd в работе [4] делают вывод о том, что решение задачи оптимизации плана при наземном планировании практически является бесполезным. К этому выводу следует добавить, что использование группировок малых КА вносит свои существенные специфические уточнения в постановку и содержание задачи планирования. В общей совокупности эти выводы являются причинами активных исследований и развития инновационных подходов к решению задач планирования, которые рассматриваются в оставшейся части обзора.

**3. Автономное планирование.** Основные преимущества автономного планирования на борту КА предопределяются возможностями использования текущих фактических данных о состоянии КА и его ресурсов, и возможностями реагирования на возникающие события в режиме реального времени. Таким образом, автономное планирование, по сути, также является адаптивным планированием.

Следует отметить, что автономное планирование в настоящее время уже активно применяется в реальной практике в ряде миссий в экспериментальном режиме. Однако, учитывая особенности экспериментальной стадии, в большинстве случаев, как правило, рассматривается возможность использования автономного планирования в комбинации с традиционным наземным планированием. В рамках такого подхода автономное планирование сводится к адаптивному уточнению плана, рассчитанного на Земле.

Также следует отметить, что возможности автономного планирования пока еще используются в ограниченных пределах, так как они напрямую зависят от производительности бортовых процессоров. В частности, в работе [11] отмечается, что производительность бортовых процессоров в большинстве случаев пока еще соответствует уровню, который примерно на два порядка ниже по сравнению с производительностью обычных лэптопов.

Составить представление о текущем уровне развития и использования возможностей автономного планирования позволяют работы, которые далее рассматриваются в этом разделе.

В работе [12] описывается комбинированная система планирования VAMOS (Verification of Autonomous Mission Planning Onboard a Spacecraft), которая разработана в Германском центре космических операций (GSOC — German Space Operations Center). Эта система используется для планирования запущенных в 2015 году спутников Biros (Berlin Infra-red Optical System), на которых установлены системы двуспектральных инфракрасных сенсоров и трехканальных оптических камер. На спутниках также установлены экспериментальные модемы, которые используются для обеспечения дополнительной связи с наземными пунктами управления с использованием спутниковой системы связи OrbComm. На борту спутника выполняется обработка снимков, которая позволяет определять облачность, а также выявлять некоторые типы объектов и событий, например, мосты и наводнения. В миссии предусмотрены три последовательных этапа, на которых планирование будет выполняться в различных режимах. На начальном этапе планирование будет выполняться традиционным образом — на Земле.

Второй и третий этапы по времени запланированы на 2016 год. На втором этапе предполагается проведение экспериментов по использованию автономного планирования с целью оценки возможностей и эффективности коррекции плана операций на основе текущих фактических телеметрических данных, получаемых в режиме реального времени. Коррекция плана операций в рамках этих экспериментов главным образом связывается с контролем свободной памяти.

Априори предполагается, что в процессе выполнения рассчитанного на Земле плана на борту КА могут оставаться значительные объемы свободной памяти, так как при планировании используются оценки потребления свободной памяти для регистрации результатов съемок с определенным запасом. Это позволяет гарантировать регистрацию результатов запланированных съемок, но также позволяет включать в план дополнительные съемки, если фактически объем свободной памяти остается больше запланированных значений. Дополнительные объемы свободной памяти также могут появляться за счет выявления и удаления бесполезных снимков, на которых цели наблюдения скрыты облачным покровом.

В основе автономного планирования на этом этапе используются следующие обстоятельства. Рассчитанный на Земле план представляется в виде множества отдельных фрагментов, каждый из которых описывает последовательность операций для проведения одной съемки. Для каждого фрагмента плана (и соответствующей съемки) также рассчитываются совокупность параметров, определяющих допустимые начальные условия для его (ее) выполнения. В частности, такими параметрами являются интервалы времени видимости цели, оценки минимально необходимого объема свободной памяти и минимально необходимого остатка энергии. На Земле также определяются моменты времени выполнения контроля телеметрических данных. При этом автономное планирование сводится к реализации относительно простой логики последовательного выбора фрагментов плана на определенном горизонте времени на основе проверки выполнимости начальных условий и заданных приоритетов съемок.

На третьем этапе запланированы эксперименты, целью которых является оценка возможностей оперативной коррекции плана съемок при появлении новых целей. В качестве типовых примеров рассматриваются следующие сценарии.

1) На Земле генерируется срочная потребность съемки извержения вулкана. Если первая возможность спутника сделать съемку, т.е. окно видимости цели существует до наступления ближайшего сеанса связи с наземной станцией, тогда спутнику через сеть OrbComm посылаются необходимые данные для оперативного включения в план съемки данной цели.

2) Инфракрасная камера обнаружила пожар, и автономно генерируется потребность в выполнении съемки с высоким разрешением, которая может быть проведена в рамках этого же окна видимости цели за счет отклонения камеры наблюдения под углом назад.

Генерация потребностей и планирование новых съемок в соответствии с рассмотренным подходом предполагает расчет соответствующих фрагментов плана. В рамках третьего этапа расчет таких фрагментов плана выполняется на борту спутника. Для упрощения автономных вычислений на борту спутника используется библиотека заранее заготовленных шаблонов фрагментов плана. С учетом этого формирование фрагмента плана сводится к расчету значений параметров данных фрагментов.

Оперативное добавление в план нового фрагмента выполняется при соблюдении следующих трех условий:

- новый фрагмент не конфликтует с уже активированным (выполняемым) фрагментом плана;
- выполняются начальные условия выполнимости нового фрагмента;
- добавление этого фрагмента плана не влечет удаления из плана последующих съемок с большим приоритетом.

В работе [11] приводится описание комбинирования автономного и наземного планирования передачи информации в наземные пункты. Основным фактором необходимости автономного уточнения наземного плана в данной работе является неопределенность объемов данных наблюдений.

Модель задачи планирования заключается в следующем. Имеется несколько пунктов управления для передачи наземных планов, несколько пунктов приема информации с КА и несколько центров заказчиков, куда выполняется передача полученной информации. При этом Заказчики определяют пункты, через которые может передаваться информация с КА.

Проведение съемки требует нацеливания КА на объект съемки, а передача информации требует только нацеливание антенны КА на наземную станцию. Съемка и передача информации могут производиться параллельно.

Данные съемки записываются в виде нескольких файлов в разные слоты (банки) памяти. Для передачи данных используется несколько каналов связи. Файлы данных одной съемки могут одновременно передаваться по разным каналам с учетом следующих ограничений. Прерывание передачи файла не допускается. Все файлы данных одной съемки должны быть переданы в рамках одного сеанса связи. В канале не допускается чередование файлов разных съемок. Также не допускается пересечение по времени передачи разных файлов, как в каналах связи, так и из слотов памяти.

Каждый потребитель имеет свой ключ шифрования данных. Данные шифруются до передачи их в канал связи из слота памяти. Используется таблица изменений ключей шифрования с задаваемым ограниченным числом изменений. В связи с этим периодически возникает необходимость в изменении ключей шифрования и переустановке этой таблицы. Переустановка таблицы требует определенного времени и прерывания передачи данных по всем каналам в течении этого времени.

Полученные файлы данных из пунктов приема передаются в центры потребителей. При корректной передаче данных центр посылает пункту управления подтверждение, которое далее пересылается спутнику. Пункты управления используются только для передачи планов спутникам и передачи подтверждений о получении данных.

При наземном планировании выполняются раздельно расчет плана съемок и расчет плана передачи данных. Горизонт времени планирования съемок определяется интервалами времени между сеансами связи. План выполнения съемок на борту спутника практически не изменяется. Единственным исключением являются ситуации, когда съемка влечет переполнение памяти. В этом случае съемка выполняется только тогда, когда возможно удалить из памяти данные других съемок с меньшим приоритетом. Не использование автономного уточнения плана съемок обосновывается тем, что это является весьма затратной вычислительной процедурой. На основании плана съемок выбираются окна видимости наземных пунктов для передачи информации. Горизонт планирования передачи информации определяется горизонтом плана съемок. Количественные характеристики плана: 1000+ съемок и 5000+ файлов данных.

Наземное планирование передачи данных выполняется на основе эвристического подхода итеративно в три этапа. На первом этапе определяется последовательность передачи данных съемок. При этом каждой съемке назначается окно видимости пункта приема информации. Эти решения принимаются исходя из минимизации времени старения информации, которое определяется интервалом времени между съемкой и передачей данных съемки в пункт приема.

На втором этапе каждому файлу данных съемок назначается канал связи, и для каждого канала и слота памяти определяется последовательность передачи файлов данных. Последовательность передачи файлов съемки начинается с файлов большего объема. Распределение файлов данных съемки между каналами связи выполняется исходя из минимизации времени простоя каналов связи, которые могут возникнуть из-за перечисленных выше ограничений.

На третьем этапе выполняется расчет сроков начала и окончания передачи файлов данных, сроков перенацеливания антенны КА на пункт приема информации, сроков переустановки таблицы изменений ключей шифрования, и проверяются все ограничения. Если какое-либо ограничение нарушается, для соответствующей съемки выбирается другое окно видимости или другая позиция в последовательности передачи съемок. Если решение не найдено, съемка удаляется из плана передачи данных.

При планировании выполняется расчет нескольких вариантов плана передачи данных, из которых выбирается наилучший. В первом варианте порядок вставки съемок в план определяется с учетом следующих эвристических правил. Предпочтение имеют съемки с большим приоритетом, а при равном приоритете предпочтение имеют более ранние съемки. Для расчета каждого последующего варианта плана порядок вставки изменяется следующим образом. Позиция съемки в последовательности передачи сдвигается вперед пропорционально разности времени старения результатов данной съемки и среднего времени старения результатов других съемок с таким же приоритетом.

План передачи данных на Земле рассчитывается исходя из оценок максимального объема данных съемок с высоким приоритетом и оценок ожидаемых объемов данных съемок с низким приоритетом. Автономное уточнение плана на борту спутника выполняется с учетом фактических объемов данных и с учетом следующих правил. Передача данных съемок с высоким приоритетом может выполняться в запланированных или в более ранних окнах видимости пунктов приема информации. Передача данных съемок с низким приоритетом может выполняться в любых окнах видимости, в частности, в более поздних.

С учетом этих правил на борт спутника посылаются план передачи данных  $FP$  и упорядоченный список съемок  $CL$ , не включенных в план передачи данных. План передачи данных посылается в виде множества  $FP = \{ \langle A, W, C, L \rangle \}$ , где  $A$  — съемка,  $W$  — окно видимости передачи данных этой съемки.  $C$  — параметризованное правило изменения окна видимости для передачи этой съемки:  $0$  — окно может изменяться произвольно,  $1$  — окно не изменяется, и  $2$  — передача съемки возможна в более ранних окнах видимости.  $L$  — самый поздний срок начала передачи данных съемки, если  $C > 0$ .

Алгоритм автономного планирования разработан с учетом того, что производительность стандартного бортового процессора примерно на два порядка ниже производительности обычного компьютера. Суть данного алгоритма в общем виде состоит в следующем. Исполняемый план передача данных съемок изначально формируется в хронологиче-

ском порядке, определенном в наземном варианте плана. Поскольку фактические объемы данных съемок априори меньше используемых оценок, которые учитывались при наземном планировании, могут возникнуть простои в использовании каналов связи. Алгоритм пытается заполнить этот простой вставкой передачи данных другой съемки, либо из списка  $CL$ , либо последующих по порядку съемок из плана  $FP$ . Такая вставка выполняется только в том случае, если она не влечет ситуацию, когда передача последующих по порядку данных съемок с более высоким приоритетом становится невозможной.

В рассматриваемой статье [11] приведены экспериментальные оценки моделирования работы системы на основе реалистических исходных данных за 1 день функционирования КА. Параметры эксперимента: 1 спутник, 5 слотов памяти, 3 канала связи, 2 уровня приоритетов съемок, 1364 съемки и 6820 файлов, 23 пункта приема данных и 115 окон видимости. Фактические объемы файлов генерировались случайным образом в интервале  $[V^{max}/4 \dots V^{max}]$ . Полученные экспериментальные оценки показывают существенное увеличение эффективности работы системы, которое, в частности, измеряется следующим соотношением. Автономное уточнение наземного плана позволяет обеспечить увеличение количества передаваемых данных в среднем с 700 до 1100 съемок.

Описанный в статье подход к автономному планированию в настоящее время используется во Французском космическом агентстве для компьютерного моделирования и проектирования космической системы. Цель — определение сбалансированных значений параметров системы: количество линий передачи данных спутника, объем передаваемых в день данных, объем памяти на борту спутника, количество и расположение наземных пунктов приема информации.

В работе [13] описывается система автономного планирования спутника MiRaTa (Microwave Radiometer Technology Acceleration). Планирование в данном случае является полностью автономным. Содержание задачи планирования главным образом определяется моделью состояний спутника. Он может находиться в одном из пяти состояний: *сбор данных, разворот, простой, передача данных, подзарядка батарей*.

В состоянии «сбор данных» спутник производит целевые измерения, для чего выполняет типовой маневр — медленное вращение по углу тангажа от 0 до 105 градусов и обратно. В этом состоянии спутник, как правило, может находиться от 22 до 30 минут. Возможные интервалы времени, когда спутник может производить измерения, определяются условиями взаимного расположения с GPS спутниками. Измерения возможны, когда как минимум 3 спутника GPS находятся в

зоне видимости спутника MiRaTa. В состоянии «разворот» выполняются необходимые развороты спутника для установления требуемой ориентации для подзарядки батарей или для передачи данных в пункт приема информации.

Процесс планирования выполняется перманентно через каждые 20 минут. В рамках каждой сессии планирования строится план на заданный горизонт времени. Определение оптимального горизонта времени планирования рассматривается в качестве основной цели в описываемых в работе экспериментах.

Планирования начинается с того, что на основе имитационного моделирования в рамках установленного горизонта планирования определяются временные окна, когда спутник может находиться в состояниях «сбор данных», «передача данных» и «подзарядка батарей». На основании этих данных определяется начальная последовательность состояний, включая расчет времени начала каждого состояния и длительности нахождения спутника в этом состоянии. Постановка данной задачи сводится к задаче смешанного целочисленного и линейного программирования. В качестве критериев планирования рассматривается максимизация суммарного времени нахождения в каждом из состояний «сбор данных» и «передача данных», и максимизация среднего запаса энергии на интервале планирования. В расчетах используются переменные, описывающие скорость потребления и восстановления ресурсов (памяти и энергии) в каждом из пяти состояний спутника.

Построенный на этом шаге план может содержать нарушения ограничений по использованию энергии и памяти. Если таковые нарушения есть, выполняется «древовидный» поиск вариантов его модификации в виде множества планов-наследников. План-наследник формируется добавлением в начальный/текущий вариант плана дополнительных состояний «передача данных» и/или «зарядка батарей», и, соответственно, необходимых в связи с этим дополнительных состояний «разворот» или «простой».

В процессе планирования выполняется поиск нескольких вариантов плана по описанному выше сценарию. Поиск нового варианта плана предполагает модификацию начальной последовательности состояний и повторение описанной процедуры поиска. Модификация начального плана выполняется в соответствии со следующими правилами. Начальный вариант плана содержит все те же состояния «сбор данных», как и в предшествующем варианте. Но если в предшествующей итерации допустимый вариант план не найден, то удаляется одно или несколько состояний «сбор данных» с наименьшими временными окнами. Поиск каждого варианта плана ограничивается временем — 25 секунд.

В работе [14] описывается концепция системы автономного планирования, которая разрабатывается в компании Orbit Logic в рамках контракта с Исследовательской лабораторией BBC США (US AFRL). Система планирования CPAW, разработанная в этой же компании и реализующая традиционный подход [3], была рассмотрена в первой части обзора.

По аналогии с ранее рассмотренной работой [12] полагается, что планирование может выполняться в трех режимах: полностью автономном, полуавтономном и традиционном режиме, когда планирование выполняется в наземном варианте. Полуавтономный режим предполагает, что спутник функционирует в соответствии с наземным планом, но при этом система автономного планирования может отдавать приоритет операциям, решение по которым принимается автономно в качестве ответных мер на обнаруженные события. В качестве начальных примеров для разработки пилотного прототипа системы рассматриваются следующие 3 ситуации:

1) Средство обзорного наблюдения спутника обнаруживает на поверхности Земли целевой объект до момента времени, когда он попадает в зону видимости радиолокационного радара с синтезируемой апертурой. В этом случае система планирования включает в план операцию наблюдения данного объекта радиолокационным радаром, рассчитывая оптимальные параметры луча выполнения съемки с учетом координат объекта.

2) В непосредственной близости со спутником обнаружен надвигающийся объект, например, космический мусор. Во избежание столкновения с этим объектом спутнику необходимо выполнить коррекцию орбиты.

3) Средства наблюдения спутника обнаружили космический объект. Для его идентификации спутник автономно принимает решение о проведении съемки обнаруженного объекта на следующем витке орбиты. Для этого необходимо рассчитать и включить в план последовательность необходимых для этого операций: нацеливание спутника на объект, настройка и включение средства наблюдения требуемого типа, регистрация данных съемки в памяти спутника, и передача данных съемки этого объекта в пункт приема информации.

Архитектура системы разрабатывается на основе многоагентного подхода. В архитектуре рассматривается один агент, мастер автономного планирования (агент MAPA), и коллекция агентов специализированного автономного планирования (агенты SAPA), которые планируют последовательности операций для выполнения целевых задач соответствующего типа. Далее эти последовательности операций об-

рабатываются МАРА агентом с целью выявления и разрешения конфликтов и уточнения итогового плана операций спутника.

Концепция системы автономного планирования предполагает использование информационного взаимодействия между спутниками. Однако в рамках данной работы этот аспект только упоминается, но детально не рассматривается.

**4. Межспутниковая связь.** Ограниченные возможности связи являются критическим фактором в обеспечении эффективности управления и использования спутников. Низкоорбитальные спутники генерируют значительные объемы информации, один спутник в день может генерировать до нескольких терабайт данных. Передача такого объема данных по технологии радиолиний становится проблематичной, так как для спутника в день может существовать одно или в лучшем случае несколько довольно узких временных окон для передачи данных наземной станции, а максимальная скорость передачи данных по радиоканалу составляет всего лишь порядка 300 мегабит/сек.

Возможности разрешения этой проблемы связываются с использованием геостационарных спутников ретрансляторов и перспективных видов связи, например, связи в оптическом диапазоне. В частности, в работе [15] приводятся следующие оценки. Такой канал связи обеспечивает передачу данных между низкоорбитальным и геостационарным спутником со скоростью до 1.8 Гигабит/сек. При этом геостационарный спутник ретранслятор способен передавать наземной станции в день до 16.2 терабайт информации. Другим существенным преимуществом оптического канала связи является его высокая надежность с точки зрения защищенности от перехвата. Это преимущество достигается благодаря узкому лучу оптической связи. На расстоянии между низкоорбитальным и геостационарным спутниками диаметр пятна луча оптической связи составляет приблизительно 360 метров, а диаметр пятна луча радиосвязи приблизительно 160 км. Кроме этого бортовая аппаратура оптической связи имеет существенно меньшие требования к объему, энергии и массе.

О текущем состоянии развития и перспективах практического использования оптической связи можно судить по следующим работам. В работе [16] приводится описание успешных испытаний оптической связи между спутником, находящимся на лунной орбите, и наземной станцией. В продолжение этих экспериментов в настоящее время проводятся разработки и экспериментальные исследования группировки спутников ретрансляторов TDRS (Tracking and Data Relay Satellites), запуск которых планируется на 2018 год.

В работе [15] приводится описание текущего состояния разработки Европейской спутниковой системы ретрансляции данных EDRS (European Data Relay System). На первом этапе разработки этой системы на спутниках устанавливались лазерные терминалы, которые обеспечивали связь между низкоорбитальными спутниками и связь этих спутников с наземными станциями. Второе поколение этих терминалов обеспечивает связь между низкоорбитальными и геостационарными спутниками и между геостационарными спутниками и наземными станциями. Для экспериментальных исследований такие терминалы были установлены на геостационарный спутник Alfasat, запущенный в 2013 году, и низкоорбитальный спутник Sentinel-1A, предназначенный для наблюдения земной поверхности, запущенный в 2014 году. Первый геостационарный спутник системы EDRS был выведен на орбиту в январе 2016 [17]. Запуски еще трех спутников запланированы на период времени с 2017 до 2020 годов.

Использование оптических каналов связи влечет определенное усложнение задачи планирования. Эти усложнения связаны с физическими свойствами оптических каналов связей и технологией установления таких каналов. Физические свойства заключаются в том, что использование оптической связи между ретранслятором и наземной станцией зависит от состояния атмосферы. Например, такая связь невозможна в условиях облачности. В качестве возможных путей преодоления таких ограничений рассматривается использование нескольких наземных станций, чтобы всегда иметь гарантированный канал оптической связи хотя бы с одной станцией, или передача части данных по менее скоростному радиоканалу.

Установление оптического канала связи между спутниками требует определенного времени, поэтому начинается за несколько минут до начала передачи данных. Установление связи выполняется в соответствии с определенным технологическим сценарием, в соответствии с которым каждый из спутников производит нацеливание луча лазера на другой спутник. Эта операция в качестве необходимых исходных условий предполагает, что каждый спутник обладает данными для определения текущей позиции спутника-респондента, и чем точнее эти данные, тем быстрее устанавливается связь. Связь Земли с геостационарным спутником-ретранслятором существует в режиме реального времени, поэтому передача файлов целевых указаний этому спутнику может выполняться либо непосредственно перед сеансом связи, либо заранее. Передача же файла целевых указаний низкоорбитальному спутнику возможна лишь тогда, когда он находится в зоне видимости наземной станции. В связи с этим планирование сеансов связей по оп-

тическому каналу выполняется в условиях двух противоречивых критериев. С точки зрения планирования работы спутника расчет времени сеансов связи должен выполняться как можно раньше. С точки зрения обеспечения более высокой точности исходных данных для установления оптического канала связи, чем позднее выполнятся этот расчет, тем лучше, точность данных выше.

Описанный выше подход к использованию оптических каналов связей в работе [18] трактуется как «использование оптических линий по технологии радиолиний, т.е. в виде отдельных сеансов связей», и подвергается критическому анализу. Вывод этого анализа в целом состоит в том, что такой подход не даст повышения оперативности получения потребителем целевой информации за счет использования оптических линий связи.

Для обоснования этого вывода в статье приводится описание и сравнительный анализ технологических операций, последовательность которых предопределяет интервал времени выполнения заявки (время между поступлением заявки и доставкой результатов наблюдений конечному потребителю). Сравняются ожидаемые оценки времени выполнения заявок при использовании радио и оптической связи. При этом рассматривается вариант работы оптических линий отдельными сеансами связи.

Для достижения наибольшей эффективности использования оптической связи в этой работе предлагаются иные принципы проектирования и функционирования орбитальной аппаратуры оптической связи, в соответствии с которыми аппаратура должна работать автоматически, автономно и непрерывно. В соответствии с этими принципами полагается, что все необходимые расчеты навигационного обеспечения рассчитываются на борту спутника. Связь между геостационарными и низкоорбитальными спутниками поддерживается постоянно. Низкоорбитальный спутник переключается с одного спутника-ретранслятора на другой, а геостационарный спутник-ретранслятор, оснащенный несколькими терминалами аппаратуры оптической связи, может связываться одновременно с несколькими низкоорбитальными спутниками. Прерывание связи, вызываемого затенением Земли, рассматривается только в случае использования одного геостационарного спутника-ретранслятора. Но даже в этом случае вследствие достаточно короткого интервала времени точность прогноза орбит спутников-респондентов остается достаточной для восстановления работы оптической линии связи.

**4. Информационное взаимодействие.** Основная цель информационного взаимодействия по аналогии с автономным планированием

ем состоит в достижении более эффективного использования возможностей спутниковых группировок для проведения требуемых наблюдений и своевременной доставки данных на Землю. Автономное планирование обеспечивает вклад в достижение данной цели за счет адаптивного изменения (или расчета) плана съемок априори назначенных спутнику целей в зависимости от возникающих непредвиденных событий и в зависимости от его текущего фактического состояния. Информационное взаимодействие предполагает использование автономного планирования и обеспечивает вклад в достижение указанной цели за счет адаптивного распределения и/или перераспределения между спутниками задач наблюдения целевых объектов и задач передачи данных на Землю в соответствии с текущей фактической ситуацией. Более кратко это можно сформулировать следующим образом: автономное планирование обеспечивает наиболее эффективное адаптивное *индивидуальное* поведение спутников, а информационное взаимодействие обеспечивает наиболее эффективное адаптивное *групповое* поведение спутников.

Неотъемлемыми составляющими задач группового поведения являются следующие дополнительные существенные и взаимосвязанные факторы, которые рассматриваются дополнительно к индивидуальному поведению спутников.

*Роли и задачи спутников.* Распределение целей наблюдения между спутниками выполняется в соответствии с установленной на спутниках аппаратурой. Если группировка состоит из множества однородных спутников, то все они могут выполнять одни и те же задачи. Если группировка состоит из множества разнородных спутников, тогда спутники выполняют различные задачи в зависимости от установленных на них средств наблюдения.

*Кластеры и группировки спутников.* Кластер можно рассматривать как частный случай группировки спутников. Кластер характеризуется тем, что спутники находятся в относительной близости между собой. В этом случае для определения позиций спутников во времени можно использовать понятие эталонной орбиты, относительно которой орбитальные данные каждого спутника могут определяться в виде малых отклонений от данных эталонной орбиты. Важным для планирования свойством кластера является то обстоятельство, что спутники кластера имеют практически одни и те же окна видимости целей наблюдения и наземных станций.

*Возможности связи и динамика сети.* Дальность прямой радиосвязи между спутниками внутри группировки ограничена. В частности, в работах [10] и [19] для разных моделей малых спутников приводятся

оценки в 4 и 100 км. Поэтому возможность информационного обмена на основе прямой радиосвязи на текущем этапе рассматривается пока применительно только к кластерам спутников. При этом образуемые кластерами спутников сети являются динамическими.

Информационный обмен между спутниками на более дальних расстояниях возможен с использованием спутниковых систем связи или спутников ретрансляторов. Следует отметить, что информационное взаимодействие элементов космической системы, спутников и наземных станций в целом выполняется в рамках динамической сети. Однако информационный обмен в рамках схем «наземная станция – спутник», «спутник – спутник ретранслятор», «наземная станция – спутник ретранслятор» происходит на основе априори рассчитываемых интервалов времени радиовидимости. Подобные расчеты относительно группировок спутников также возможны, но только в наземных условиях, так как они являются весьма трудоемкими. Выполнение подобных расчетов на борту спутников для обеспечения автономного группового поведения является как минимум не рациональным подходом, если вообще возможным в силу ограниченных возможностей бортовых ресурсов.

Описанные факторы и обстоятельства позволяют сделать вывод о существенном многообразии в направлениях исследований и многообразии возможных постановках задач планирования и управления в области группового поведения спутников. Далее в этом разделе приводится обзор нескольких работ в этих направлениях.

В работе [19] описывается сценарий информационного взаимодействия внутри кластера из 8-ми спутников в рамках миссии EDSN (Edison Demonstration of Smallsat Networks). Запуск спутников был запланирован на 2015 год. ([https://en.wikipedia.org/wiki/Edison\\_Demonstration\\_of\\_Smallsat\\_Networks](https://en.wikipedia.org/wiki/Edison_Demonstration_of_Smallsat_Networks) - информация о неудачном запуске) Цель миссии — измерения скорости движения заряженных частиц на низких околоземных орбитах.

Информационное взаимодействие в данном случае используется для организации передачи данных измерений в наземные пункты в соответствии со следующим сценарием. В каждый момент времени один из спутников играет роль капитана, остальные — роль лейтенантов. Капитан является центральным звеном сети. Он запрашивает у остальных спутников, лейтенантов, данные и передает их наземной станции. Роль капитана со временем передается от одного спутника другому.

Связь капитана с лейтенантом называется сессией. В начале сессии капитан в течении 50 секунд посылает 6 пинг-запросов с указа-

нием идентификатора лейтенанта, с которым устанавливается связь. Получив пинг-сигнал, лейтенант выполняет следующие действия:

1. Проверяет корректность сигнала (идентификатор «кому» и контрольную сумму).
2. Ждет 60 секунд, пока капитан продолжает посылать пинг-сигналы.
3. Посылает пакеты данных капитану. Первым посылает пакет с телеметрической информацией, далее — пакеты с данными измерений.
4. Выключает радио и удаляет все посланные пакеты данных из памяти.

Полученные пакеты данных капитан сохраняет в памяти для дальнейшей передачи на Землю по принципу FIFO.

Сессия продолжается в течение фиксированного периода времени около четырех минут. Если лейтенант не отвечает (не услышал пинг-сигналы или у него разряжены батареи), капитан ждет этот период времени и только после этого начинает сессию со следующим спутником-лейтенантом.

Последовательность сессий со всеми лейтенантами называется минорным циклом, в течение которого капитан собирает данные со всех 7 спутников-лейтенантов. После каждого минорного цикла роль капитана переходит к следующему спутнику по кругу. До начала минорного цикла каждый спутник с помощью GPS данных уточняет свои часы, позицию и скорость движения. Далее он сравнивает текущее время с моментами времени, предварительно загруженными в память, и на основании этого сравнения определяет, какой спутник будет капитаном на следующем минорном цикле.

В течение минорного цикла может происходить рассинхронизация часов спутников, до 12 секунд. Поэтому при выполнении операций используются буферные запасы времени. Например, лейтенант включает радио за 30 секунд до начала времени связи с капитаном и выключает его через 30 секунд после окончания окна времени для связи. Критическим ресурсом является запас энергии. Его априори не хватает на то, чтобы лейтенант мог держать радио все время включенным для связи с капитаном. Поэтому лейтенант включает радио только тогда, когда он ожидает получение сообщений от капитана.

Каждый минорный цикл длится приблизительно 25 часов. Последовательность из 8-ми минорных циклов, т.е. когда каждый спутник один раз становится капитаном, называется мажорным циклом. В рамках запланированной миссии предполагается, что после 2-3 мажорных циклов спутники могут находиться слишком далеко друг от друга (более 100 км), чтобы осуществлять межспутниковую радиосвязь. Тем не менее

они будут продолжать функционировать по описанному сценарию до окончания миссии, которая запланирована на 60 дней.

Каждый спутник на основании GPS данных до начала минорного цикла моделирует свою орбиту на два минорных цикла вперед, т.е. на горизонте времени 50 часов вперед. На основании этого моделирования рассчитываются временные окна, когда и какие операции могут быть выполнены, и с учетом приоритетности операций рассчитывается план спутника. При этом часть операций планируется только на основании времени. Например, межспутниковая связь планируется через определенное время после начала минорного цикла. Часть операций планируется на основании времени и позиции спутника. В частности, связь с наземной станцией. После того как составлено расписание, все операции выполняются строго в соответствии с запланированными временными параметрами.

Таким образом, описанный сценарий информационного взаимодействия является априори разработанным и не адаптивным. Однако это, по всей видимости, соответствует начальному этапу стадии практических разработок и экспериментов, так как в качестве дальнейшего плана в статье обозначен достаточно широкий спектр направлений исследований. В их числе обозначены такие направления, как:

- управление конкретными спутниками за счет передачи им сообщений с Земли и маршрутизации сообщений в сети спутников;
- автономное конфигурирование сети и выбор капитана (или капитанов) на основе информационного взаимодействия и сравнения состояния спутников. Например, выбор капитана с учетом сравнения объема данных для передачи на землю текущих запасов энергии и с учетом качества временного окна связи с наземной станцией;
- многоэтапная маршрутизация пакетов данных при их передаче в наземный пункт через капитана;
- анализ топологии и учет фактора динамичности сети;
- использование возможности того, что несколько капитанов могут обеспечить передачу большего объема данных на землю;
- и другие.

В работе [10] описываются результаты компьютерного моделирования информационного взаимодействия внутри кластера малых спутников в рамках динамической сети. В модели предметной области предполагается, что на спутниках установлены камеры для съемки, а спутники, обеспечивающие связь с наземными станциями, имеют достаточно памяти для передачи данных в режиме «запомнил — передал». Основным ограничением является запас энергии, и потребление энергии на связь оказывает значительное влияние на производительность системы.

Задача наблюдения предполагает выполнение нескольких подзадач. Результат выполнения подзадачи (например, данные съемки) передается другому спутнику, где происходит следующий шаг выполнения задачи (например, другая съемка и/или объединение данных съемок).

Моделирование выполняется на основе многоагентного подхода. Каждому спутнику в системе соответствует свой агент. Подзадачи распределяются между спутниками на основе модифицированного CNP (Contract Net Protocol) протокола. Агент спутника, инициирующий протокол информационного взаимодействия, называется аукционером. Он анонсирует данные подзадач своим прямым соседям в сети, которые далее повторяют это сообщение своим соседям и т.д. Все агенты, получившие запросы и имеющие необходимые ресурсы, рассчитывают оценку стоимости выполнения подзадачи и посылают ее аукционеру.

Оценка стоимости выполнения рассчитывается с помощью формулы, в которой в качестве параметров используются размер подзадачи, оставшийся объем энергии спутника, максимальный объем энергии, который он может потратить, и расстояние до агента аукционера, измеряемое количеством этапов передачи сообщения по сети. Оценки передаются аукционеру по маршруту получения данных подзадачи в обратном направлении. Если через агента спутника передается несколько оценок других спутников, то этот агент передает далее агенту аукционеру только одну наилучшую оценку стоимости. На основании полученных оценок аукционер выбирает агента спутника, предложившего минимальную оценку стоимости, и передает ему все необходимые данные для выполнения подзадачи. Таким образом, в соответствии с данными оценками подзадачи распределяются наиболее близким и наименее загруженным в текущий момент времени спутникам.

Динамическая сеть моделировалась с помощью расчета динамической матрицы смежности, элементы которой описывали возможность или невозможность радиосвязи между соответствующей парой спутников в зависимости от расстояний во времени. Расстояния между спутниками во времени рассчитывались с помощью Кеплеровской модели.

В статье приведены результаты эксперимента моделирования со следующими входными параметрами. Кластер состоит из 125 спутников и описывается эталонной орбитой. Орбита каждого спутника задавалась в виде случайных незначительных отклонений от эталонной орбиты. Связь между двумя спутниками полагалась возможной, если расстояние между ними не превышало 4 км. Таким образом, в эксперименте динамическая топология сети характеризуется следующим образом. В определенные моменты времени, при прохождении перигея орбиты, сеть является наиболее связанной. В промежуточные моменты

времени между ними связность сети становится ниже. Но при этом всегда существует возможность многоэтапной передачи сообщений между любыми двумя спутниками.

Верхняя граница суммарного времени на передачу сообщения между двумя спутниками и на его обработку оценивалось в 100 миллисекунд, что, по мнению авторов, является достаточно реалистичным значением.

Через каждые 100 секунд в систему вводились 5 новых задач, каждая из которых состояла из пяти подзадач. Длительность эксперимента определялась одной орбитой. Общее количество задач и подзадач 280 и 1400 соответственно.

Модель потребления энергии описывалась в условных единицах следующими оценками:

- выполнение одной подзадачи — 1 единица;
- передача сообщения между двумя спутниками — 0.005 единицы;
- передача задачи между двумя спутниками — 0.5 единицы;
- восполнение энергии — 0.005 единицы в секунду;
- максимальной объем энергии спутника — 10 единиц.

Основные результаты эксперимента и выводы заключаются в следующем. Потребление энергии на информационное взаимодействие сопоставимо с потреблением энергии на выполнение подзадач, которое в соответствии с входными параметрами эксперимента оценивается в 1400 единиц. Аукционы (распределение задач и подзадач) в большинстве случаев по времени успевают закончиться, прежде чем происходят изменения топологии сети. Время связи между двумя спутниками существенно больше, чем длительность аукциона. То есть, с точки зрения аукционера, локальная сеть в течение аукциона является статической. Если изменение сети влечет срыв аукциона, аукционер может повторно начать аукцион с большей вероятностью его успешного выполнения. Стоимость (в единицах потребления энергии) проведения аукционов в условиях динамической сети меньше, чем стоимость отслеживания изменений сети и проведение аукционов в интервалах времени между ними, когда сеть остается неизменной.

**5. Заключение.** Основным трендом в развитии систем планирования космических миссий в настоящее время является переход к парадигме, в соответствии с которой спутникам передаются не целевые данные, а детальные планы, определяющие временные параметры проведения съемок и передачи данных на Землю, и которые рассчитываются на борту спутников. Переход к этой парадигме главным образом создает необходимые предпосылки для преодоления объективных недостатков

традиционных методов планирования и управления, которые были рассмотрены в первом разделе обзора. Необходимость в переходе к этой парадигме также предопределяется спецификой задач планирования, которая возникает при использовании группировок малых спутников.

Наиболее распространенной практикой является ситуация, когда каждый спутник управляется и контролируется операторами в наземных пунктах управления. При этом детальный план операций спутника может уточняться в интерактивном режиме. Обзор традиционных систем планирования показывает, что эта возможность рассматривалась в качестве одного из основных требований к их разработке [4]. Однако фактор многочисленности группировок малых спутников влечет существенное увеличение нагрузки на операторов. Кроме того, планирование миссий группировок малых спутников предполагает координацию действий спутников, и уже не сводится к расчету множества отдельных и независимых планов спутников. Очевидно, что наличие таких обстоятельств может только усилить проявление объективных недостатков традиционных методов планирования и управления.

Реализация новой парадигмы сводится к развитию и использованию методов автономного адаптивного планирования и информационного взаимодействия спутников. Реализация этих методов, в свою очередь, существенным образом зависит от реальных и перспективных технических возможностей спутников и спутниковых систем, а именно от возможностей бортовых вычислительных процессоров и возможностей связи со спутниками и между спутниками. В связи с этим можно отметить, что развитие и использование этих методов находятся на различных стадиях исследований. Различные методы автономного адаптивного планирования уже находятся на стадии экспериментальных летных испытаний. Методы информационного взаимодействия спутников пока еще находятся на стадии теоретических исследований с использованием методов компьютерного моделирования. Единственная известная из обзора работ миссия, в которой целью была демонстрация начальных возможностей информационного взаимодействия кластера малых спутников, описывается в работе [19].

В ближайшей перспективе следует ожидать продолжения активных исследований и появления новых результатов в области разработки указанных методов. В частности, в отмеченной выше работе [19] приводится достаточно большой список направлений исследований в части развития методов информационного взаимодействия между спутниками.

По мнению автора данной статьи, одним из критически важных следует рассматривать направление исследований, затронутое в работе [14], которое состоит в следующем. Развитие методов автономного

планирования и информационного взаимодействия до настоящего времени рассматривается вне зависимости друг от друга. В области автономного планирования пока еще превалирует подход, когда автономное планирование выполняется в комбинации с наземным планированием и рассматриваются ситуации, когда распределение целей наблюдения между спутниками выполняется исключительно при наземном планировании. В области же информационного взаимодействия, как правило, рассматриваются ситуации с переназначением целей наблюдения между спутниками без должного учета текущих оперативных планов спутников. В связи с этим комплексные исследования методов автономного планирования и методов информационного взаимодействия пока еще остаются вне фокуса внимания.

С точки зрения долгосрочного прогноза, следует выделить те технические возможности, развитие которых будет оказывать критически важное влияние на эффективность функционирования космических систем наблюдения целевых объектов на Земле и в космическом пространстве. Это возможности вычислительных бортовых устройств и возможности связи с космическими аппаратами. При обеспечении вычислительных возможностей, сопоставимых с наземными возможностями, создаются условия, позволяющие рассматривать полноценное автономное планирование. В частности, без необходимости выполнения каких-либо вспомогательных расчетов на Земле и, соответственно, без какой-либо комбинации с наземным планированием. Развитие технических возможностей связи с космическими аппаратами предполагает в идеале обеспечение связи в режиме реального времени или по крайней мере существенное увеличение пропускной способности каналов связи. Пути реализации таких возможностей рассматриваются в работе [18]. Обеспечение такого уровня связи позволит разрешить проблему «узкого горлышка», когда каналы связи не способны обеспечить передачу объема данных, которые могут накапливать космические аппараты в результате проведения съемок целевых объектов. При этом значимость решения этой проблемы в ближайшем будущем может только возрастать в связи с использованием малых космических аппаратов.

### **Литература**

1. *Davis T.M.* Operationally Responsive Space – The Way Forward // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–7–49.
2. *Chien S. et al.* A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2012.
3. *Herz E.* EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.

4. *Iacopino C., Harrison S., Brewer A.* Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations // Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSPSS). 2015. pp. 45–52.
5. *Wörle M. et al.* The Incremental Planning System – GSOC’s Next Generation Mission Planning Framework // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
6. *Gottfert T. et al.* Robust Commanding // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
7. *Michel J. et al.* A Portable Autonomous Ground Station to Support a Constellation of CubeSats // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–6–39.
8. *Platzer P., Wake C., Gould L.* Smaller Satellites, Smarter Forecasts: GPS-RO Goes Mainstream // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–7–53.
9. *Schwab T.* Implementing a Small Satellite Information Enterprise Using a Modular Open Architecture Approach Based on International Standards // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–1–2.
10. *van der Horst J., Noble J.* Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics // Acta Futura. 2012. vol. 5. pp 143–151.
11. *Maillard A. et al.* Ground and board decision-making on data downloads // Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015.
12. *Lenzen C. et al.* Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
13. *Kennedy A. et al.* Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–6–37.
14. *Herz E., George D., Esposito T., Center K.* Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
15. *Martin-Pimentel P. et al.* Laser Com in space, the operational concept // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
16. *Israel D., Edwards B., Wilson K., Moores J.* An Optical Communications Pathfinder for the Next Generation Tracking and Data Relay Satellite // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
17. European Data Relay System. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_Data\\_Relay\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/European_Data_Relay_System) (дата обращения 01.06.2016)
18. *Королев Б.* Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств // Космическая техника и технология. 2014. Вып. 1(4). С. 39–47.
19. *Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.* The EDSN Intersatellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-WS1.

**Карсаев Олег Владиславович** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальная поддержка принятия решений, транспортная логистика, многоагентные системы. Число научных публикаций — 90. [karsaev@ips-logistic.com](mailto:karsaev@ips-logistic.com); 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)3283570.

O.V. KARSAEV  
**REVIEW OF CONVENTIONAL AND INNOVATIVE SATELLITE  
MISSION PLANNING SYSTEMS**

---

*Karsaev O.V. Review of Conventional and Innovative Satellite Mission Planning Systems.*

**Abstract.** The paper is a review of conventional and innovative planning systems of satellite operations in missions of observation of target objects on the ground and in space. In conventional planning systems satellites are considered executors of plans computed by ground control centers. This approach has some disadvantages that may significantly decrease efficiency of satellites operation. The paper includes a description and an analysis of these disadvantages. The existence of these disadvantages and challenges of small satellites mission planning are the reasons of re-search and development of innovative methods and planning systems that mainly assume adaptive autonomous on-board planning and information interaction between satellites. Development of the latter possibility is considered a basis that may provide adaptive group behavior of satellites.

The review includes a description of different innovative planning systems that are either already used in experimental modes in actual missions or so far being developed and investigated via simulation. The paper also contains a review of some prospective elaborations in the area of communication between satellites as these opportunities can significantly influence the mission planning problem statement.

**Keywords:** autonomous planning, information collaboration, group behavior.

---

**Karsaev Oleg Vladislavovich** — Ph.D., senior researcher of intelligent systems laboratory, St. Petersburg Institute for informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: intelligent decision support, transportation logistics, agent based systems. The number of publications — 90. [karsaev@ips-logic.com](mailto:karsaev@ips-logic.com); 39, 14th line, St.Petersburg, 199178; office phone: +7(812)3283570.

### References

1. Davis T.M. Operationally Responsive Space – The Way Forward. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–7–49.
2. Chien S. et al. A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations. Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2012.
3. Herz E. EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
4. Iacopino C., Harrison S., Brewer A. Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations. Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWSPSS). 2015. pp. 45–52.
5. Wörle M. et al. The Incremental Planning System – GSOC’s Next Generation Mission Planning Framework. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
6. Gottfert T. et al. Robust Commanding. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
7. Michel J. et al. A Portable Autonomous Ground Station to Support a Constellation of CubeSats. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–6–39.
8. Platzer P., Wake C., Gould L. Smaller Satellites, Smarter Forecasts: GPS-RO Goes Mainstream. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–7–53.

9. Schwab T. Implementing a Small Satellite Information Enterprise Using a Modular Open Architecture Approach Based on International Standards. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–1–2.
10. van der Horst J., Noble J. Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics. *Acta Futura*. 2012. vol. 5. pp 143–151.
11. Maillard A. et al. Ground and board decision-making on data downloads. Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015.
12. Lenzen C. et al. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
13. Kennedy A. et al. Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRATA Mission. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15–6–37.
14. Herz E., George D., Esposito T., Center K. Onboard Autonomous Planning System. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
15. Martin-Pimentel P. et al. Laser Com in space, the operational concept. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
16. Israel D., Edwards B., Wilson K., Moores J. An Optical Communications Pathfinder for the Next Generation Tracking and Data Relay Satellite. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014.
17. European Data Relay System. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_Data\\_Relay\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/European_Data_Relay_System) (accessed 01.06.2016)
18. Korolev B. [Space optical communication technology aimed at a more responsive control and prompted delivery of data to the end user during space operations]. *Kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Space engineering and technology*. 2014. vol. 1(4), pp. 39–47. (In Russ.).
19. Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K. The EDSN Intersatellite Communications Architecture. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14–WS1.