

О.В. КАРСАЕВ
**АНАЛИЗ ОПЕРАТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ
МНОГОСПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВКАХ**

Карсаев О.В. Анализ оперативности информационных взаимодействий в низкоорбитальных многоспутниковых группировках.

Аннотация. Исследуются коммуникационные сети и информационные взаимодействия в низкоорбитальных многоспутниковых группировках, выполняющих задачи дистанционного зондирования Земли. Исследования вопросов создания коммуникационной сети в данном случае является необходимым условием, так как возможности и эффективность информационного взаимодействия непосредственно зависят от возможностей сети связи. В основе создания коммуникационной сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи, рассматривается DTN (от англ. Delay-and-Disruption Tolerant Networking) технология, а в основе маршрутизации сообщений — CGR (от англ. Contact Graph Routing) подход. Эти технология и подход в оригинале разрабатываются и используются для обеспечения связи с космическими аппаратами, находящимися в далеком космосе. Поэтому в работе рассматриваются вопросы и задачи, возникающие в связи с использованием DTN технологии и CGR метода маршрутизации применительно к низкоорбитальным спутниковым группировкам. Целью исследования информационного взаимодействия является разработка эффективных схем (протоколов) взаимодействия. Анализируются схемы информационного взаимодействия, которые могут использоваться группировкой спутников при автономном планировании поступающих заявок на дистанционное зондирование Земли. Наряду с автономным планированием также исследуется информационное взаимодействие, которое может использоваться для реализации сетевого управления группировкой спутников в случае наземного планирования. Эффективность схем информационного взаимодействия оценивается оперативностью выполнения заявок. Измерение оценок оперативности выполняется на основе имитационного моделирования коммуникационной сети и соответствующей схемы информационного взаимодействия.

Ключевые слова: автономное планирование, сетевое управление, информационное взаимодействие, группа малых спутников, DTN технология, CGR метод маршрутизации.

1. Введение. Сегодня никто уже не оспаривает прогнозы роста околоземных микроспутниковых группировок и постепенного замещения малыми спутниками нынешних тяжелых космических аппаратов по целому ряду направлений космической деятельности. Миниатюризация бортовых систем и появление новых схемотехнических решений позволяют кардинально снизить массу аппаратов и решать с помощью малых спутников задачи, которые ранее традиционно решались «большими» аппаратами, прежде всего в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и связи. Ожидается, что в ближайшей перспективе ежегодно будет запускаться от 300 до 500 микроспутников, при этом более половины из них придется на многоспутниковые группировки ДЗЗ [1].

Малые космические аппараты открывают качественно новые возможности синтеза космических систем [2], обусловленные системными свойствами многоспутниковых группировок. Например, для космических систем ДЗЗ возможна реализация следующих системных эффектов:

- многопозиционность, многодиапазонность и одновременность наблюдения за объектом с нескольких спутников, обеспечение эффекта стереосъемки;

- возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры различных спутников, приводящей к повышению информативности наблюдения;

- обеспечение непрерывности наблюдения за счет возможности «передачи эстафеты» наблюдения последовательно входящим в зону видимости объекта другим спутникам орбитальной группировки.

Реализация таких и прочих преимуществ многоспутниковых группировок без информационного межспутникового взаимодействия представляется невозможной. Основной проблемой в организации взаимодействия является специфика связи: постоянная связь между спутниками и со спутниками невозможна. Разработка эффективных схем взаимодействия с учетом этой специфики межспутниковой связи и есть цель настоящего исследования. В качестве объекта исследований рассматривается низкоорбитальная группировка малых спутников, выполняющая миссию ДЗЗ. Эффективность схем взаимодействия оценивается двумя целевыми показателями функционирования космической системы, оперативностью выполнения заявок и производительностью космической системы в целом. Под оперативностью подразумевается период времени между появлением заявки и доставкой результатов наблюдений конечному потребителю; под производительностью — количество заявок, которые космическая система способна выполнять за определенный период времени с учетом имеющихся ограничений.

В общем случае могут рассматриваться заявки двух типов, сценарии выполнения которых предполагают проведение одиночных или нескольких взаимосвязанных между собой сеансов наблюдения. В данной работе рассматриваются только заявки первого типа. Разработка схем информационного взаимодействия для выполнения заявок второго типа является объектом исследования следующего этапа, и будет выполняться с учетом результатов экспериментальных исследований, представленных в данной работе.

Статья организована с следующим образом. Во втором разделе приводится анализ предметной области задачи исследования, включающий аспекты специфики связи, автономности планирования и аспекты информационного взаимодействия. Эффективность функционирования многоспутниковых группировок при использовании тех или иных схем информационного взаимодействия оценивается с помощью разрабатываемой имитационной модели, описание которой приводится в разделе 3. В разделе 4 описываются результаты экспериментальных исследований схем информационного взаимодействия, рассматриваемых на данном этапе.

2. Анализ предметной области задачи исследования.

2.1. Специфика связи в космических системах. Узлами коммуникационной сети космической системы являются спутники и наземные станции. Связь между узлами сети может устанавливаться только в определенные интервалы времени, когда узлы находятся в области видимости друг друга, и периодическое отсутствие связи между узлами сети является объективной реальностью. Отсутствие или периодическое отсутствие связи для наземного интернета приводит к потере пакетов данных и считается отклонением от нормы. Однако потеря данных при информационном взаимодействии между объектами космической системы недопустима. В связи с этим, начиная с 2002 года в рамках программы Advanced Exploration Systems (AES), цель которой заключается в разработке ключевых технологий для исследования и освоения планет Солнечной системы, специалистами NASA разрабатывается DTN (от англ. Delay-and-Disruption Tolerant Networking) технология передачи данных. В основе данной технологии рассматриваются следующие основные принципы. Если узел не смог передать пакет данных, то информация не удаляется, а сохраняется. Попытки передачи продолжаются, пока узел не свяжется с другим узлом и не отправит ему данные. Информация в любом случае доходит до получателя. При этом для эффективного использования пропускной способности каналов связи может выполняться фрагментация передаваемых данных на несколько пакетов меньшего размера. Обратная сборка пакетов в исходное сообщение может происходить в промежуточных и/или конечных узлах передачи данных. Более детальное описание DTN технологии можно найти в [3]. Следует отметить, что Международный консультативный комитет по космическим системам передачи данных (CCSDS) предлагает всем космическим агентствам мира устанавливать на свои новые автоматические и пилотируемые аппараты оборудование, работающее по DTN технологии. Такое оборудование уже установлено на борту МКС.

Сети, узлы которых являются мобильными и связь между узлами непостоянна, в общем случае называются MANET (Mobile Ad hoc Network) сетями. Для маршрутизации сообщений в таких сетях могут использоваться и/или разрабатываться различные протоколы. Например, в работе [4] для маршрутизации сообщений в сети космической системы рассматривается протокол Cjdns. Однако возможность или эффективность использования того или иного протокола определяется конкретной спецификой рассматриваемой сети. Основной спецификой сети космической системы является предсказуемость контактов между узлами сети. В соответствии с этой спецификой в рамках DTN технологии для маршрутизации сообщений был разработан CGR (от англ. Contact Graph Routing) подход [5]. В данном подходе рассматривается построение графа, вершинами которого являются не узлы сети, а контакты между ними. Использование такого необычного графа позволяет применять обычные алгоритмы для маршрутизации сообщений, например алгоритм Дейкстры.

CGR метод маршрутизации, как и DTN технология в целом, в исходном виде разрабатывались для обеспечения связи с космическими аппаратами, находящимися на большом удалении от Земли [6]. Однако они также рассматриваются и для организации связи в околоземных многоспутниковых группировках. Результаты таких исследований можно найти в работах [7, 8]. Этот подход также используется в данной работе. Детальная реализация и развитие этого подхода применительно к низкоорбитальным группировкам ДЗЗ рассматривается во второй части статьи.

2.2. Наземное и автономное планирование. В системах управления космическими аппаратами наряду с наземным планированием развивается и постепенно внедряется в реальную практику автономное планирование. Необходимость перехода к автономному планированию обусловлена объективными факторами, ограничивающими эффективность наземного планирования. Анализ этих факторов и текущего уровня развития и внедрения автономного планирования является содержанием данного подраздела.

Учет состояния ресурсов. Планирование операций, в частности операций наблюдения, выполняется с учетом прогнозирования состояния возобновляемых ресурсов, заряда аккумуляторных батарей и объема свободной памяти на горизонте времени планирования. Однако точность прогнозирования состояния возобновляемых ресурсов в случае наземного планирования весьма низкая.

Расход энергии рассчитывается на основе запланированных и планируемых операций спутника, а ее восполнение — на основе времени нахождения спутника на участках орбиты, освещаемых

Солнцем. При этом точность моделирования восполнения энергии является весьма относительной, так как могут возникать непредвиденные факторы. В частности, если спутник имеет вращательное движение, то восполнение энергии будет происходить в значительно меньшей степени.

Объем свободной памяти спутника во времени рассчитывается на основе плана сеансов наблюдения и плана передачи полученных результатов наблюдений на Землю. Однако в случае многоспутниковых группировок планирование передачи полученных результатов на Землю является в принципе невозможным, так как передача данных управляется на сетевом уровне.

Вследствие рассмотренных проблем при прогнозном моделировании состояния восполняемых ресурсов в реальной практике управления одиночными космическими аппаратами используются различные методики, примеры которых можно найти в [9, 10]. В частности, при моделировании состояния заряда аккумуляторных батарей используется заниженная скорость восполнения заряда, а для моделирования использования бортовой памяти спутника — увеличенные объемы ожидаемых результатов наблюдений. Такой подход позволяет обеспечить определенную гарантию выполнимости наземного плана, но при этом влечет существенное снижение производительности космической системы. В противном случае возникает большая вероятность того, что многие из запланированных сеансов наблюдения могут оказаться не выполнимыми.

Учет фактов выполнения запланированных операций. Анализ этого фактора достаточно подробно рассмотрен в работе [11]. Краткое описание проблемы заключается в следующем. Пусть t^1 время окончания последнего состоявшегося сеанса связи «Земля – спутник», а t^2 , t^3 и так далее — времена начала предстоящих запланированных сеансов связей. Соответственно, горизонт планирования может быть представлен в виде последовательности интервалов времени $[t^1, t^2]$, $[t^2, t^3]$ и так далее. Текущий вариант плана называется *мастер планом*. Фрагмент этого плана, переданный на борт космического аппарата в ходе последнего сеанса связи, называется *исполняемым фрагментом плана*. Он, как правило, соотносится с периодом времени $[t^1, t^2]$, и при продолжении планирования все изменения в мастер плане возможны только в последующих интервалах времени.

Если сеанс связи, начинающийся в момент времени t^2 , оказывается успешным, то спутник получает целеуказания на соответствующий период времени $[t^2, t^3]$, а в наземную систему планирования поступают результаты выполнения запланированных заявок. Если есть невыполненные заявки, они

планируются повторно, но уже только на последующие периоды времени $[t^3, t^4]$, $[t^4, t^5]$ и так далее.

В случае, если этот сеанс связи не оказывается успешным, спутник не получает оперативных целеуказаний на период времени $[t^2, t^3]$, а все заявки, запланированные в мастер плане на этот период времени, должны быть перепланированы на последующие периоды времени. В этом случае продолжительность периода времени $[t^2, t^3]$ становится критически важным фактором. Он (период) может оказаться относительно малым, недостаточным для перепланирования мастер плана. Последовательность сеансов связи, интервалы времени между которыми малы, в статье называется сессией сеансов связи, и проблема организации процесса планирования главным образом рассматривается в связи с такими сессиями.

Для решения данной проблемы предлагается подход, в котором на ближайший период времени определяются сценарии развития ситуации на основе всех возможных комбинаций установления и не установления запланированных сеансов связи, и для каждого сценария рассчитывается соответствующий мастер план. Такой подход требует значительных вычислительных мощностей, так как может возникать необходимость в расчете десятков вариантов мастер плана. Для сокращения количества рассчитываемых вариантов рассматриваются различные допущения.

В связи с этой проблемой в работах [12, 13] рассматривается инкрементальный режим планирования, основной целью которого является обеспечение существенного ускорения процесса планирования. Такой подход предполагает непрерывный процесс планирования, в ходе которого при поступлении новых заявок или не выполнении ранее запланированных выполняется либо оптимизация, либо коррекция текущего варианта плана.

Автономное планирование предполагает использование достаточно очевидных и интуитивно понятных возможностей для преодоления рассмотренных проблем, а именно — использование фактических данных о текущем состоянии восполняемых ресурсов. Как следствие, прогнозирование их состояния на горизонте времени планирования становится значительно более точным. При выявлении фактов невыполнения запланированных сеансов наблюдения и/или появления потребностей в проведении дополнительных наблюдений их планирование должно происходить в режиме реального времени на борту спутника. Однако реализация этих возможностей требует решения определенных задач и в текущее время остается областью активных исследований. В связи с этим в большинстве случаев по-прежнему используются системы наземного планирования, описание которых, в частности, приводятся в [9, 14, 15].

Описание реализации возможностей автономного планирования можно найти в работах [16-20]. Следует заметить, что в реальной деятельности автономное планирование, как правило, рассматривается в интеграции с наземным планированием. Для краткости такой подход далее будет называться полуавтономным планированием. Он предполагает, что решение каких-то задач выполняется в наземном пункте. Результаты решения этих задач передаются спутнику, которому также делегируется возможность окончательного формирования плана с учетом фактического состояния его ресурсов. При этом спутнику может делегироваться возможность автономного решения не всех, а только отдельных подзадач планирования. Например, в работе [16] спутнику делегируется возможность только планирования передачи на Землю полученных результатов наблюдения.

Полностью автономное планирование рассматривается достаточно редко. В качестве примера можно привести работу [18]. В данном случае возможность полностью автономного планирования обусловлена относительно простой постановкой задачи. Спутнику известна долгосрочная цель наблюдений, а модель его поведения определяется в виде машины состояний. В текущий момент времени спутник может находиться в одном из пяти состояний: сбор данных, разворот, простой, передача данных на Землю и подзарядка батарей. Задача планирования сводится к определению последовательности состояний, в которых должен находиться спутник, и расчету соответствующих моментов времени для перехода из одного состояния в другое.

Использование многоспутниковых группировок малых спутников в конечной перспективе ассоциируется с автономным и/или полуавтономным планированием. Тем не менее использование наземного планирования в ближайшей перспективе может оставаться объективной необходимостью. В связи с этим в данной работе наряду с разработкой схем взаимодействия при автономном и полуавтономном планировании также рассматривается сетевое управление, которое может использоваться при наземном планировании и предполагает передачу целеуказаний спутникам и доставку результатов наблюдений на Землю по сети через цепочки спутников.

2.3. Информационное взаимодействие и варианты построения многоспутниковых группировок. Информационные взаимодействия в многоспутниковых группировках на сегодняшний день являются относительно новой областью исследований. В связи с этим определенного внимания заслуживает проект EDSN (Edison Demonstration of Smallsat Networks), в котором предпринималась попытка выполнения космической миссии с использованием информационного взаимодействия в

группировке спутников. К сожалению, попытка оказалась неудачной, при запуске спутники были потеряны.

Описание данного эксперимента и проекта в целом можно найти в работах [21, 22]. В работе [21] также рассматривается достаточно большой список вопросов, исследование которых, по мнению авторов, является необходимым для разработки и развития информационного взаимодействия в многоспутниковых группировках. В эксперименте рассматривалась группировка из 8-ми спутников, информационные взаимодействия между которыми предполагалось проводить в рамках последовательных циклов. В каждом цикле один из спутников играет роль капитана, а остальные — роль лейтенантов. Задача капитана заключается в сборе и передаче на Землю полученных результатов наблюдения со всех спутников. Для сбора данных капитан в заранее определенном порядке и в определенные моменты времени последовательно устанавливает контакты с остальными спутниками. Эксперимент должен был продолжаться порядка 60-ти дней, в течение которых спутники находятся в относительной близости, на расстоянии не более 100 км друг от друга, и имеют возможность установления каналов связи каждого с каждым.

В основе разработки схем информационного взаимодействия в случае автономного планирования может рассматриваться CNP (от англ. Contract Net Protocol) протокол. Этот протокол достаточно широко используется в системах планирования в различных предметных областях. Вариант использования модифицированной версии этого протокола для организации информационного взаимодействия в группировке спутников исследуется в работе [10].

В работах [10, 21, 22] информационные взаимодействия рассматриваются в случае, когда в любой момент времени в группировке спутников возможна связь каждого с каждым. Это возможно, когда спутники постоянно находятся в непосредственной близости. Принципиально важным отличием данной работы является то, что информационное взаимодействие рассматривается в общем случае, то есть при любом орбитальном построении группировки спутников.

Разработка системы управления и схем информационного взаимодействия может предопределяться организационной схемой спутниковой группировки. В частности, в работе [2] исследуется иерархическая схема построения многоспутниковых группировок с выделением спутников лидеров и соответствующий подход к разработке системы управления. В работе [23] рассматриваются и сравниваются две схемы построения группировок, которые определяются как «распределенный» и «фрагментированный космический аппарат» соответственно. В первом случае

подразумевается система равноправных спутников, а во втором — система спутников, в которой каждый космический аппарат имеет свое узкое функциональное назначение. Несмотря на то, что показывается сопоставимость достоинств обеих схем, определенное преимущество отдается схеме распределенного космического аппарата, так как она более устойчива к выходу из строя отдельных спутников.

3. Модель многоспутниковой группировки. Разрабатываемая с помощью среды *AnyLogic* модель предназначена для имитационного моделирования поведения и информационного взаимодействия группировки спутников и наземных пунктов. Архитектура модели, описывающей поведение спутников, приведена на рисунке 1. Она состоит из компонентов двух типов, модулей планирования и агентов устройств.

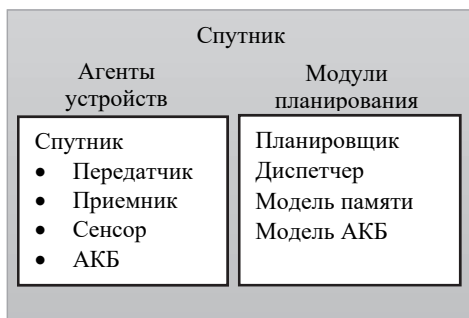


Рис. 1. Архитектура имитационной модели спутника

Модули планирования обеспечивают планирование операций, выполняемых спутником, и тем самым определяют его поведение. В частности, *диспетчер* выполняет маршрутизацию сообщений и определяет порядок отправки исходящих сообщений. *Планировщик* на основе взаимодействия с *планировщиками* других спутников обеспечивает распределенное планирование наблюдений. *Модель памяти* и *Модель АКБ* прогнозируют состояние памяти и аккумуляторных батарей и используются *планировщиком* в процессе планирования наблюдений.

Агенты моделируют выполнение запланированных операций соответствующими физическими устройствами. Агент спутника моделирует состояние спутника, рабочее или не рабочее, и в запланированные моменты времени установления контактов включает приемные и передающие устройства и посылает запрос

соответствующему спутнику на установление контакта. Контакт устанавливается, если оба спутника находятся в рабочем состоянии.

Агент передатчика моделирует отправку исходящих сообщений в соответствии с определяемой *диспетчером* очередью. Моделирование передачи сообщений включает определение времени на передачу сообщения с учетом объема передаваемых данных и скорости их передачи в канале связи, и проверку возможности выполнения передачи сообщения на основе контроля текущего заряда батареи.

Агент приемника анализирует возможность получения входящих сообщений на основе контроля доступной памяти и сортирует их на две группы. Если получателем сообщения является свой спутник, сообщение переправляется *планировщику*, если другой спутник, сообщение записывается в очередь исходящих сообщений.

Агент сенсора моделирует выполнение запланированных наблюдений, проверяя возможность их выполнения с учетом текущего заряда батареи и наличия свободной памяти.

Агент АКБ по мере выполнения всех операций, а также при переходе спутника на освещенную/затененную часть орбиты, уточняет текущий уровень заряда.

Более детальное описание основных функциональных возможностей имитационной модели рассматривается в последующих подразделах второй части статьи. В частности, в первом подразделе приводятся формальные определения и описание методов расчета плана и графа контактов, являющихся основой CGR подхода к маршрутизации сообщений. План контактов рассчитывается до начала имитационного моделирования на основе введенных исходных данных, количества спутников и орбитального построения группировки, количества и координат расположения наземных пунктов и так далее.

Во втором подразделе рассматриваются задачи, связанные с реализацией DTN технологии в рассматриваемом случае. Компонентом модели спутника, решающим эти задачи и реализующим DTN технологию в целом, является *диспетчер*.

В третьем подразделе рассматривается использование данной модели для имитационного моделирования сетевого управления при наземном планировании.

В четвертом подразделе рассматриваются варианты схем информационного взаимодействия спутников в случае автономного и полуавтономного планирования наблюдений. Все задачи, связанные с реализацией логического уровня информационного взаимодействия и выполнением распределенного планирования, решаются *планировщиком*.

3.1. План и граф контактов. Основой CGR подхода к маршрутизации являются план и граф контактов. План контактов определяет времена установления каналов связи между узлами сети на заданном горизонте времени. Контакты $Contact(i)$ описываются в виде четверок:

$$Contact(i) = \langle x(i), y(i), s(i), f(i) \rangle,$$

где $x(i)$ и $y(i)$ — узлы сети, между которыми устанавливается однонаправленный канал связи (от x к y), $s(i)$ и $f(i)$ — моменты времени установления и окончания канала связи, i — идентификационный номер контакта.

В DTN технологии полагается, что после отправки сообщения узел сети должен получать подтверждение о его получении. В соответствии с этим план контактов должен предусматривать установление синхронизированных по времени пар встречных каналов связи от x к y и от y к x . То есть, если в плане присутствует контакт $\langle x(i), y(i), s(i), f(i) \rangle$, то также должен быть контакт $\langle x(j), y(j), s(j), f(j) \rangle$ такой, что $x(i)=y(j)$, $y(i)=x(j)$, $s(i)=s(j)$ и $f(i)=f(j)$.

Контакты плана контактов являются вершинами графа контактов, а дугами — однонаправленные отношения между контактами. Дуги между контактами i и j (от i к j) устанавливаются, если выполняются следующие условия: $y(i)=x(j)$ и $s(i)<f(j)$. Физический смысл дуг между контактами заключается в следующем. Сообщение, переданное из узла x в узел y в канале связи i , может быть передано в канале связи j из узла y в следующий узел z .

Вес дуг $w(i, j)$ в графе контактов определяется по формуле:

$$w(i, j) = \begin{cases} 0, & s(j) < s(i) \\ s(j) - s(i), & s(j) \geq s(i). \end{cases}$$

То есть вес дуг между контактами i и j физически означает оценку минимального времени хранения сообщения в начальном узле контакта j до его (сообщения) передачи в рамках этого контакта j в следующий узел z . В соответствии с физическим смыслом дуг графа результатом решения задачи маршрутизации является поиск маршрута с наименьшим временем доставки сообщения конечному получателю.

Расчет графа контактов выполняется в три этапа. На первом этапе рассчитываются временные окна видимости «Земля – спутник» и «спутник – спутник». Окна видимости «спутник – спутник» определяются с учетом опционально задаваемой дальности передачи сигнала, которую

может обеспечить аппаратура передачи данных, устанавливаемая на малых спутниках. Данные расчеты выполняются методом имитационного моделирования орбитального движения группы спутников с помощью общедоступной библиотеки моделирования полета спутников и выполнения баллистических расчетов *Orekit*.

На втором этапе рассчитывается план контактов. На основе каждого окна видимости узлов сети x и y определяется два контакта (канала связи), из x в y и из y в x . Расчет плана контактов, по сути, сводится к определению моментов времени установления и окончания контактов внутри окон видимости. Время установления и окончания контактов рассчитывается с учетом указания входного параметра: количества одновременных каналов связи, которое может обеспечивать аппаратура передачи сообщений, устанавливаемая на малых спутниках. При этом учитываются два дополнительных требования:

1) Установление каналов связи «Земля – спутник» имеет приоритет по отношению к установлению каналов связи «спутник – спутник». Это требование рассматривается ввиду того, что каналы связи «Земля – спутник», как правило, являются «узким звеном» коммуникационной сети космической системы.

2) Длительность наиболее коротких по времени контактов должна быть максимизирована. Это требование рассматривается в связи с тем, что длительности контактов с учетом всех заданных ограничений имеют взаимозависимость. Увеличение длительности одних контактов влечет уменьшение длительности других контактов.

Рассчитанный план контактов передается всем узлам сети, как спутникам, так и наземным пунктам. На третьем этапе в узлах сети на основе плана контактов формируются графы контактов, которые используются для распределенной и автономной маршрутизации сообщений.

3.2. Передача сообщений и управление контактами. В соответствии со спецификой DTN сети в узлах сети могут возникать очереди сообщений, подлежащих передаче. Непосредственным результатом решения задачи маршрутизации является определение контакта для дальнейшей передачи сообщения. При наличии в узле сети множества сообщений, подлежащих передаче, они распределяются между контактами, и каждому контакту может быть сопоставлено несколько сообщений. То есть в результате маршрутизации сообщений в узле сети может возникать несколько очередей исходящих сообщений, каждая из которых рассматривается в связи с определенным контактом, и в связи с каждой очередью рассматривается необходимость в решении ряда дополнительных подзадач.

Порядок передачи сообщений в каждой очереди определяется в зависимости от типа сообщений. В целом рассматриваются сообщения трех типов: 1) сообщения информационно-командного взаимодействия; 2) передача результатов наблюдений; 3) служебные сообщения. Служебными являются сообщения, подтверждающие успешную передачу сообщений первых двух типов между двумя узлами сети. В соответствии с DTN технологией только после получения такого подтверждения спутник удаляет из памяти передаваемые данные.

Объем данных в служебных сообщениях и сообщениях информационно-командного взаимодействия по сравнению с объемом результатов наблюдений ничтожно мал. Соответственно, длительность передачи сообщений этих двух типов ничтожна мала по сравнению с длительностью передачи сообщений, содержащих результаты наблюдений. Поэтому эти сообщения передаются в первую очередь в произвольном порядке, и передача этих сообщений не требует решения каких-то дополнительных задач, за исключением задачи, которая рассматривается при передаче сообщений информационно-командного взаимодействия. В определенных случаях в сообщениях этого типа может указываться время доставки сообщения конечному адресату. В связи с этим при маршрутизации таких сообщений в узлах сети происходит дополнительный контроль своевременности доставки сообщений, и в случае выявления нарушения указанного срока рассматривается необходимость в принятии того или иного решения. Возможные ситуации такого типа с содержательной точки зрения рассматриваются в двух последующих подразделах.

Сообщения, содержащие результаты наблюдений, передаются во вторую очередь. При этом может возникать одна из двух ситуаций: суммарный объем данных в этих сообщениях меньше либо больше пропускной способности контакта. Необходимость в решении дополнительных задач возникает во втором случае, когда суммарный объем данных превышает пропускную способность контакта. В этом случае становится важным определение порядка, в котором должны передаваться эти сообщения. Определение порядка, в частности, может учитывать приоритетность передаваемых данных и требования конечных потребителей к срокам доставки результатов наблюдений. Введение порядка позволяет разбить все множество сообщений на две группы: сообщения, которые могут быть и которые не могут быть переданы в течении установленного контакта вследствие ограничения его пропускной способности.

DTN технологией предусматривается разбиение данных на несколько Bundle пакетов меньших размеров для обеспечения максимальной эффективности использования пропускной способности контактов. В соответствии с этим из второй группы выбирается наиболее приоритетное сообщение, данные которого разбиваются на два пакета, один из которых может быть передан в рамках рассматриваемого контакта с учетом ограничения пропускной способности.

В отношении второго пакета данных выбранного сообщения, а также всех прочих сообщений второй группы в целом, выполняется повторная маршрутизация, но уже с дополнительным ограничением: передача этих сообщений в рамках рассматриваемого контакта невозможна. Таким образом, в результате повторной маршрутизации исходящих сообщений (пакетов) с учетом этого требования происходит итеративное перераспределение сообщений (пакетов) между контактами (соответствующими очередями). В результате этого для каждого контакта определяется упорядоченный список сообщений (пакетов), которые могут быть переданы в рамках контакта с учетом его пропускной способности.

Кроме пропускной способности контакта очередь исходящих сообщений также ограничивается объемом свободной памяти, которая остается у спутника респондента. С целью выявления данного ограничения спутники сообщают друг другу наличие объема свободной памяти при установлении контактов (в первых сообщениях запросах на установление контакта), а также в течении контактов в служебных сообщениях. Взаимообмен такими данными обеспечивает возможность спутникам решать дополнительную задачу: определение возможности досрочного окончания контакта. Решение данной задачи позволяет управлять выключением передающей и принимающей аппаратуры при отсутствии или окончании потребностей в передаче сообщений и тем самым обеспечивать энергосберегающий режим функционирования спутника.

В связи с возможностью разбиения результатов наблюдений на множество пакетов меньшего объема в конечных узлах маршрутов передачи производится моделирование сборки исходных данных. Пакеты, являющиеся фрагментами одного исходного сообщения, могут придти в конечный узел маршрута в разное время. Временем выполнения заявки является время доставки последнего пакета.

3.3. Наземное планирование и сетевое управление. В соответствии с результатами анализа предметной области (раздел 2.2) в данной работе наряду с автономным и полуавтономным планированием наблюдений рассматривается использование сетевого управления группировкой спутников при наземном планировании.

При этом использование сетевого управления, по сути, сводится к использованию CGR метода маршрутизации и DTN технологии передачи сообщений, но требует решения дополнительной задачи.

Использование сетевого управления при наземном планировании предполагает необходимость согласования результатов планирования с временными возможностями сетевого управления. Содержательный смысл этой задачи можно пояснить следующим образом. Результатами наземного планирования является расчет целеуказаний спутникам по выполнению назначенных им сеансов наблюдений, в том числе расчет моментов времени начала и окончания этих сеансов. Согласование этих результатов с возможностями сетевого управления предполагает поиск маршрутов доставки всех целеуказаний соответствующим спутникам. При этом результаты планирования полагаются согласованными, если для каждого целеуказания существует маршрут его доставки соответствующему спутнику до момента времени начала запланированного сеанса наблюдения. Непосредственным результатом наземной маршрутизации целеуказаний является сопоставление им сеансов связи «Земля – спутник», в рамках которых должна выполняться отправка целеуказаний.

Процесс планирования в рассматриваемой наземной системе может выполняться адаптивно в режиме реального времени. При таком подходе предполагается, что при поступлении новых заявок перманентно выполняется адаптивная коррекция текущего плана, и может происходить перепланирование и переназначение уже запланированных сеансов наблюдений. Обоснование преимуществ такого подхода приводятся в работах [12, 13]. Следует заметить, что в случае такого подхода перепланирование сеансов наблюдений также должно выполняться с учетом согласования данных решений с временными возможностями сетевого управления.

При передаче спутникам запланированных в наземной системе целеуказаний в заголовках сообщений может указываться срок их доставки — время начала наблюдения. При указании этой информации в промежуточных узлах маршрута выполняется контроль соблюдения данного срока. Невозможность своевременной доставки целеуказаний может возникнуть в результате не установления каких-то запланированных контактов. В случае выявления такой ситуации в узле сети вместо дальнейшей передачи целеуказаний формируется и передается на Землю сообщение о не доставке этого целеуказания соответствующему спутнику.

С целью моделирования и экспериментальной апробации сетевого управления рассматривается возможность интеграции

разрабатываемой имитационной модели с системой наземного планирования, представленной в работе [13].

3.4. Автономное и полуавтономное планирование. В данном подразделе описываются схемы информационного взаимодействия, которые могут использоваться в основе автономного и полуавтономного планирования наблюдений по заявкам.

Автономное планирование предполагает, что заявки передаются группировке спутников, и все расчеты, связанные с планированием, выполняются бортовыми вычислительными устройствами спутников. В основе информационного взаимодействия в этом случае по аналогии с работой [10] может рассматриваться схема CNP протокола. Спутники, получающие заявки из наземного пункта управления, являются инициаторами данного протокола. В соответствии со схемой инициаторы протокола посылают спутникам, обладающим аппаратурой наблюдения требуемого типа, запросы на выполнение наблюдений. При получении такого запроса каждый спутник рассчитывает и посылает инициатору наиболее ранний интервал времени, когда он может выполнить наблюдение целевого объекта / района с учетом всех ограничений и ранее запланированных наблюдений. При получении ответов от всех респондентов и оценки своих собственных возможностей инициатор протокола выбирает спутник для выполнения данного наблюдения и посылает ему сообщение с назначением.

Использование такой схемы взаимодействия требует решения следующих дополнительных проблем:

1. Базовый сценарий использования CNP протокола предполагает последовательное распределение заявок. Поэтому, если спутник одновременно получает несколько заявок, их распределение с учетом временных задержек передачи сообщений в DTN сети может происходить недопустимо долго. Для разрешения данной проблемы может рассматриваться вариант модификации CNP протокола, в котором происходит распределение сразу же нескольких заявок.

2. Возможна ситуация, когда одновременно выполняются CNP протоколы, инициированные несколькими спутниками. В этом случае возникает проблема на стороне респондентов этих протоколов, связанная со следующим обстоятельством. В интервале времени между посылкой предложения по выполнению одной заявки и получением сообщения о ее назначении или не назначении спутник может получить запрос на выполнение сеанса наблюдения по другой заявке. В этом случае возникает неопределенность с оценкой состояния восполняемых ресурсов. Спутник должен либо дожидаться

ответа в рамках первого протокола, либо резервировать определенные объемы восполняемых ресурсов на выполнение первой заявки. При этом последний вариант может иметь негативные последствия. Например, ввиду нехватки объемов восполняемых ресурсов с учетом зарезервированных объемов на выполнение первой заявки он отказывается от выполнения второй заявки, но позже узнает о том, что он не выбран исполнителем первой заявки.

3. Оценка возможности выполнения заявки может предполагать перепланирование: возможность выполнения этой заявки взамен ранее запланированной, но менее приоритетной. Реализация этой возможности предполагает, что респондент наряду с временем выполнения наблюдений должен посылать инициатору данные по заявке, которая подлежит перепланированию.

Полуавтономное планирование предполагает, что окончательное планирование наблюдений выполняется автономно группировкой спутников, но на основании использования результатов наземного решения отдельных подзадач. В качестве такой подзадачи планирования может рассматриваться расчет для каждой заявки потенциально возможных интервалов времени выполнения наблюдений каждым из спутников. В этом случае заявки, передаваемые группировке спутников, могут содержать дополнительную информацию: $\{<Sat, TW(Sat)>\}$ — упорядоченный список спутников с указанием окна времени возможного сеанса наблюдения каждым спутником (список спутников упорядочивается по возрастанию времени). Использование этих данных позволяет рассматривать следующую схему информационного взаимодействия для итеративного распределения и планирования заявок.

Изначально данные по заявке с Земли передаются спутнику, указанному в списке первым. При получении заявки спутник оценивает возможность включения в свой план сеанса наблюдения и принимает решение в соответствии со следующими правилами:

А. Сеанс наблюдения добавляется в план спутника, если это является возможным с учетом удовлетворения всех ограничений. При этом все данные по заявке, в том числе и список $\{<Sat, TW(Sat)>\}$, сохраняются в памяти спутника.

В. Если добавление сеанса наблюдения в план влечет нарушение каких-либо из ограничений, то выполняется попытка его добавления за счет удаления из плана ранее запланированного наблюдения по менее приоритетной заявке.

С. Если добавление сеанса наблюдения является невозможным, то заявка пересылается следующему в списке $\{<Sat, TW(Sat)>\}$ спутнику.

Д. Если добавление сеанса наблюдения в соответствии с правилом B оказалось возможным, то удаленная из плана заявка пересылается другому спутнику, который определяется правилом C .

Передача сообщений происходит с контролем своевременности их доставки. В качестве срока доставки сообщения указывается время начала выполнения наблюдения $TW(Sat)$ соответствующим спутником Sat . При возникновении невозможности своевременной доставки сообщения создается и далее передается новое сообщение, в котором определяется новый потенциальный исполнитель данной заявки. В качестве такового из списка $\{<Sat, TW(Sat)>\}$ выбирается первый спутник, которому возможна своевременная доставка данного сообщения.

4. Результаты экспериментальных исследований.

Функциональные возможности имитационной модели, реализованные на первом этапе исследований, позволили получить начальные сравнительные оценки оперативности выполнения заявок при использовании наземного планирования, сетевого управления, автономного и полуавтономного планирования. В случаях автономного и полуавтономного планирования информационное взаимодействие выполнялось в соответствии со схемами, рассмотренными в подразделе 3.4.

При наземном планировании оценки времени выполнения заявки рассчитывались по следующей методике. Для каждого спутника группировки рассчитывались возможные временные параметры ее выполнения:

- t^1 — самый ранний по времени сеанс связи «Земля – спутник» для передачи целеуказаний;
- t^2 — самое раннее время, когда возможен сеанс наблюдения, при условии, что $t^2 > t^1$;
- t^3 — самый ранний по времени сеанс связи «Земля – спутник» для доставки результатов наблюдений на Землю такой, что $t^3 > t^2$.

На основе данных расчетов исполнителем заявки выбирался спутник с наиболее ранним моментом времени t^3 . В случае использования сетевого управления оценки времени выполнения заявок рассчитывались аналогичным образом с той лишь разницей, что вместо сеансов связей «Земля – спутник» находились наилучшие по времени маршруты доставки целеуказаний спутнику и маршруты доставки результатов наблюдений на Землю.

В экспериментах рассматривались группировка из 16 спутников, орбитальное построение которой визуально может быть представлено с помощью рисунка 2 [7]. Были проведены

две серии экспериментов. Во второй серии рассматривался сокращенный вариант этой группировки из 8 спутников. Наземная инфраструктура в обоих случаях состояла из одного наземного пункта.

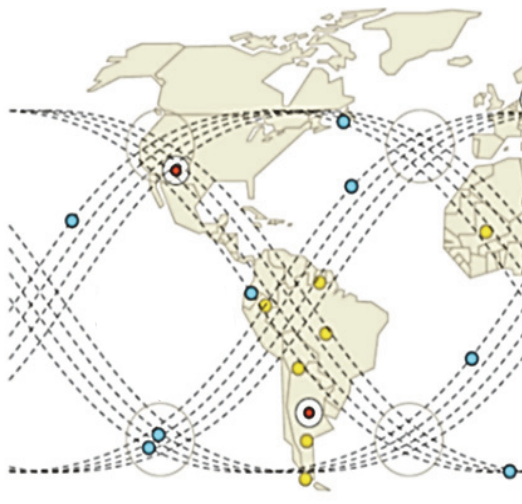


Рис. 2. Орбитальное построение группировки из 16 спутников

Планы контактов рассчитывались при различных значениях параметров D и N , где D — максимальная дальности передачи сообщений в межспутниковых каналах связи, а N — количество одновременных каналов, которое могут обеспечить устанавливаемые на малых спутниках устройства связи. В обеих сериях экспериментов рассчитывалось три варианта плана контактов, $B1$: $D=1\ 000$ км, $N=1$, $B2$: $D=10\ 000$ км, $N=1$, $B3$: $D=10\ 000$ км, $N=2$. Варианты плана контактов, рассчитанные для группировки из 16 спутников, на интервале времени прохождения одного витка орбиты приведены на рисунке 3. В данном случае это время порядка 51 минуты.

Из рисунка видно, что в варианте $B1$ для каждого спутника запланированы периодические контакты с двумя спутниками (например, у спутника 01 запланированы контакты со спутниками 08 и 13), в вариантах $B2$ и $B3$ — с четырьмя спутниками (например, у того же спутника 01 запланированы контакты со спутниками 08, 10, 11 и 13). Длительность контактов изменяется от 4-5 минут (вариант $B1$) до 15-25 минут (варианта $B3$).

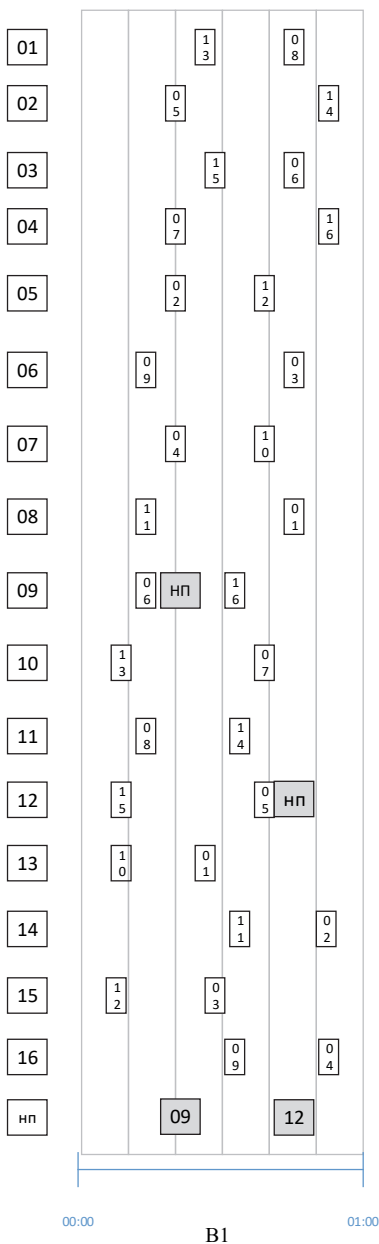


Рис. 3а. Фрагмент плана контактов B1 (D=1 000 км, N=1)

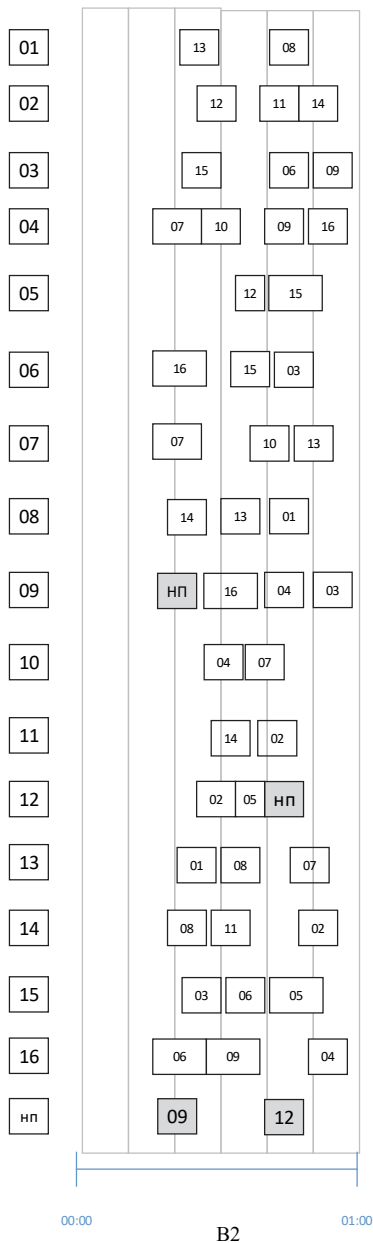


Рис. 3в. Фрагмент плана контактов В2 (D=10 000 км, N=1)

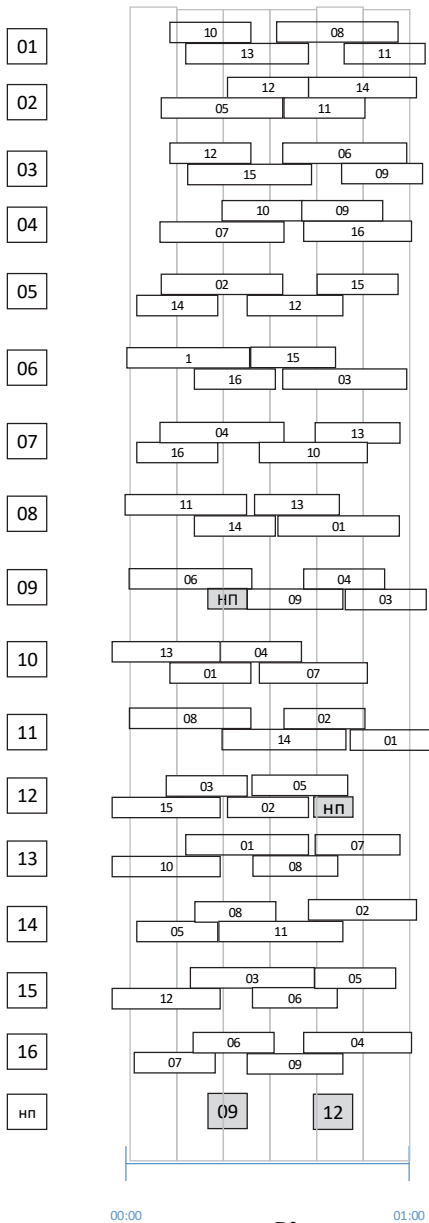
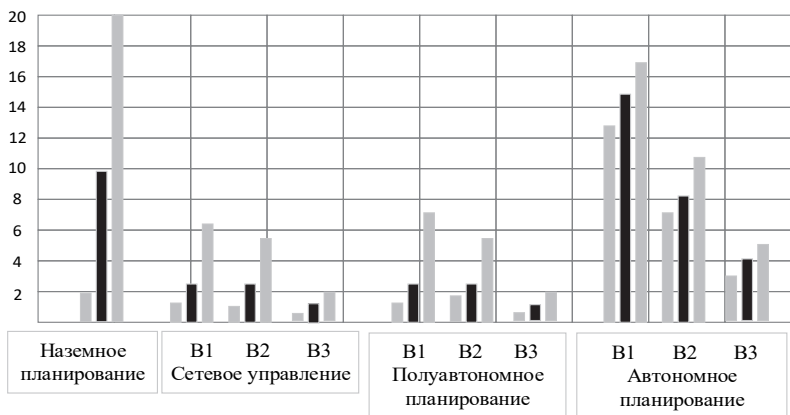
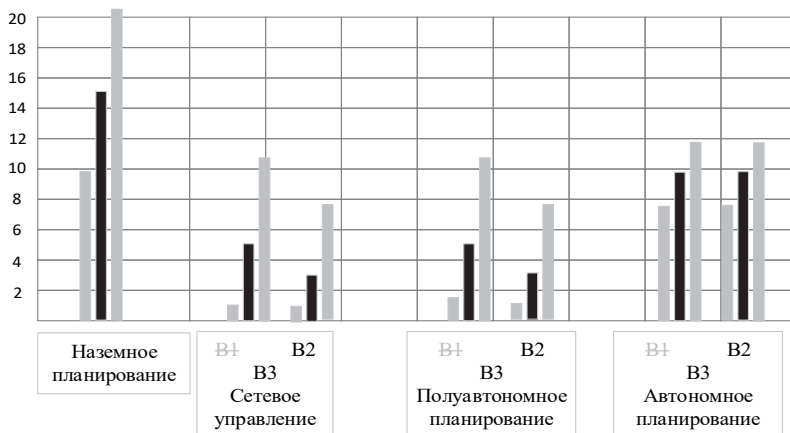


Рис. 3с. Фрагмент плана контактов В3 (D=10 000 км, N=2)

Полученные в экспериментах оценки оперативности выполнения заявок (минимальное, среднее и максимальное время) представлены на рисунках 4а и 4б. Отсутствие оценок оперативности на рисунке 4б в варианте В1 объясняется тем, что при максимальной дальности передачи радио сигнала 1000 км в группировке из 8 спутников существуют пары спутников, между которыми не возможна пересылка сообщений, даже с использованием DTN технологии.



а)



б)

Рис. 4. Оценки оперативности выполнения заявок: а) 16 спутниками; б) 8 спутниками

В экспериментах моделировалось выполнение наблюдений 20 целей с различными координатами. В соответствии с этим во всех экспериментах каждой серии имеются одни и те же временные окна, когда цели находятся в зоне видимости тех же самых спутников. При этом моделирование выполнения наблюдений производилось без учета состояния восполняемых ресурсов, то есть без учета объема доступной памяти и уровня заряда аккумуляторных батарей. При таких условиях оперативность выполнения заявки, по сути, определяется временем информационного взаимодействия до выполнения наблюдения цели и временем доставки результатов наблюдений на Землю.

Время доставки результатов при использовании сетевого управления и автономного и полуавтономного планирования определяется механизмами DTN технологии сетевого уровня. Поэтому различие оперативности выполнения заявок при таких подходах определяется исключительно оперативностью информационного взаимодействия спутников до выполнения наблюдений.

Совпадение оценок оперативности при сетевом управлении и полуавтономном планировании объясняется тем, что в условиях экспериментов при наземном и полуавтономном планировании заявки назначаются одним и тем же спутникам, спутникам с наиболее ранним временем наблюдения.

В случае автономного планирования время выполнения заявок в разы больше по сравнению с полуавтономным планированием. Это объясняется тем, что в основе схем автономного планирования, как правило, рассматривается CNP протокол, длительность которого в условиях DTN сети может быть весьма существенной. Для иллюстрации данного обстоятельства на рисунке 5 приведен пример временного лога выполнения CNP протокола.

В приведенном примере инициатором протокола является спутник 13. На первой фазе протокола спутник инициатор выполняет диалог с каждым из других спутников с целью определения всех возможностей выполнения заявки. Время выполнения этой фазы определяется временем выполнения самого продолжительного диалога. В данном примере это диалог со спутником 06, который продолжается порядка двух часов. Время выполнения второй фазы протокола определяется временем диалога со спутником, который выбран исполнителем заявки. В данном случае это спутник 12. Итоговая продолжительность протокола в данном примере составляет порядка четырех часов.

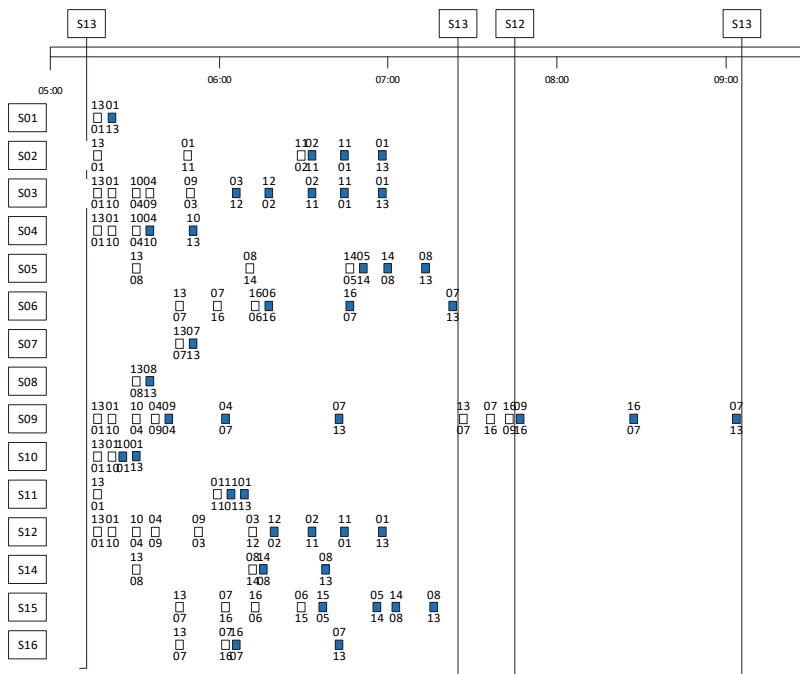


Рис. 5. Пример временного лога CNP протокола

5. Заключение. Объектами исследований в работе являются схемы информационного взаимодействия и метод маршрутизации данных в космических сетях связи, в которых возможность установления каналов связи между узлами сети существует только в определенные интервалы времени, и как следствие, передача сообщений происходит с временными задержками.

В основе построения сети рассматриваются DTN технология и CGR подход к маршрутизации сообщений. В исходном варианте эти технологии разрабатывались для обеспечения связи с космическими аппаратами, находящимися в дальнем космосе. Поэтому в работе рассматриваются вопросы, возникающие в связи с применением этих технологий для построения сети в низкоорбитальных многоспутниковых группировках.

В работе исследуются схемы информационного взаимодействия, которые могут использоваться в основе трех возможных подходов к управлению многоспутниковых группировок: 1) сетевое управление при наземном планировании; 2) полуавтономное и 3) полностью автономное планирование. Результаты экспериментов показывают, что

наилучшая оперативность выполнения заявок на наблюдение целевых объектов и/или районов достигается при использовании сетевого управления и полуавтономного планирования. При таких подходах время выполнения заявок по сравнению с традиционным наземным планированием сокращается в 3-5 раз.

В основе полностью автономного планирования в работе рассматривается CNP протокол информационного взаимодействия. Результаты численных экспериментов показывают, что использование такого подхода в условиях DTN сети не дает какого-либо улучшения оперативности выполнения заявок по сравнению с тем же традиционным наземным планированием.

Несмотря на то что при использовании сетевого управления и полуавтономного планирования по результатам экспериментов получены сопоставимые оценки оперативности, в плане дальнейшего развития полуавтономное планирование имеет ряд потенциальных преимуществ. На текущем этапе исследований рассматривались заявки, выполнение которых сводится к одиночным сеансам наблюдений. Наиболее интересным направлением дальнейшего развития представляется исследование и разработка схем информационного взаимодействия в случае заявок, предполагающих выполнение сложных сценариев наблюдений. В основе этого направления предполагается развитие концептуальной модели командного поведения многоспутниковой группировки, описанной в работе [24].

Литература

1. *Пайсон Д.* Малые спутники в современной космической деятельности // Спутниковая связь и вещание. 2017. С. 64–69.
2. *Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т 4(4). С. 45–56.
3. *Соколов Н.Л. и др.* Основные принципы создания космической информационной сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи // Лесной вестник. 2015. Т. 19. № 3. С. 137–144.
4. *Мирошников Д.Ю., Симонова Е.В.* Распределенное мультиагентное планирование выполнения задач в группе устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т.18. № 4-4. С. 793–798.
5. *Araniti G. et al.* Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance // IEEE Communication Magazine. 2015. pp. 38–46.
6. *Birrane E., Burleigh S., Kasch N.* Analysis of the contact graph routing algorithm: Bounding interplanetary paths // Acta Astronautica. 2012. no. 75. pp. 108–119.
7. *Fraire J.A. et al.* Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations // Journal of Computer Networks and Communications. 2017. vol. 2017. 18 p.
8. *Caini C., Firrincieli R.* Application of Contact Graph Routing to LEO satellite DTN communications // IEEE International Conference on Communications. 2012. pp. 3301–3305.

9. *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 (IWPS). 2015. pp. 45–52.
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. *Gottfert T. et al.* Robust Commanding // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1808.
12. *Wörle M.T. et al.* The Incremental Planning System — GSOC’s Next Generation Mission Planning Framework // Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1785.
13. *Скобелев П.О. и др.* Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 10(171). С. 60–70.
14. *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. vol. 2. pp. 1160–1176.
15. *Herz E.* EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning // Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1728.
16. *Maillard A. et al.* Ground and board decision-making on data downloads // Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015. pp. 273–281.
17. *Lenzen C. et al.* Onboard Planning and Scheduling Autonomy within in Fire Bird Mission // Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1759.
18. *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.
19. *Herz E. et al.* Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1783.
20. *Li J., Chi Y.* Planning and Scheduling of an Agile EOS Combining Onground and On-board Decisions // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2018. vol. 382. no. 3. pp. 032023.
21. *Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K.* The EDSN Intersatellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-WS1.
22. *Chartres J., Sanchez H., Hanson J.* EDSN Development Lessons Learned // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-VI-7.
23. *Клошников В.Ю.* Построение кластеров малых космических аппаратов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59(6). С. 423–428.
24. *Городецкий В.И., Карсаев О.В.* Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2017. № 1-2. С. 234–248.

Карсаев Олег Владиславович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: искусственный интеллект, логистика, многоагентные системы, планирование. Число научных публикаций — 100. karsaev@ips-logic.com; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +79119095270.

Поддержка исследований. Разделы 2.1, 2.3, 3 и 4 работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00840), раздел 2.2 в рамках бюджетных исследований (№ 0073-2019-004).

O.V. KARSAEV

**ANALYSIS OF INFORMATION INTERACTION EFFICIENCY IN
LOW-ORBIT SATELLITE CONSTELLATIONS**

Karsaev O.V. Analysis of Information Interaction Efficiency in Low-Orbit Satellite Constellations.

Abstract. The objects of the research are networks and information interactions in low-orbit satellite constellations performing tasks of remote sensing of the Earth. Research of network creation questions in this case is a necessary condition as opportunities and efficiency of information interaction directly depend on opportunities of a network. DTN (Delay-and-Disruption Tolerant Networking) technology is a basis of the network creation and CGR (Contact Graph Routing) approach is a basis of message routing. DTN technology and CGR approach are originally developed and used to provide communication with spacecraft located in a deep space. Therefore, the article discusses issues and problems arising in the context of their use in relation to low-orbit satellite constellations. The purpose of the information interaction study is development of effective interaction schemes (protocols). In the paper, the schemes of information interaction that can be used by a group of satellites in case of autonomous planning are considered. Along with autonomous planning, the paper also considers information interaction that can be used to implement network control of a satellite constellation in the case of ground planning. The effectiveness of the information interaction schemes are assessed by efficiency of orders' execution. Measurement of efficiency is estimated via simulation of the communication network and the corresponding scheme of information interaction.

Keywords: Autonomous Planning, Network Control, Information Interaction, Small Satellite Group, DTN Technology, CGR Routing.

Karsaev Oleg Vladislavovich — Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: artificial intelligent, logistics, agent based systems, planning and scheduling. The number of publications — 100. karsaev@ips-logistic.com; 39, 14th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +79119095270.

Acknowledgment. This research, sections 2.1, 2.3, 3 и 4, is supported by RFBR (grant no. 18-01-00840), section 2.2 – State research (№ 0073-2019-004).

References

1. Paison D. [Small satellites in modern activity]. *Sputnikovaya svaz I veschaniye – Satellite communication and broadcasting*. 2017. pp. 64–69. (In Russ.).
2. Potiupkin A.Y., Danilin N.S., Selivanov A.S. [Clusters of small spacecraft as a new type of space objects]. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informacionniye sistemy – Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2017. Issue 4(4). pp. 45–56. (In Russ.).
3. Sokolov N.L. et al. [Basic principles for the creation of a space information network tolerant to disruptions and delays in communication channels]. *Lesnoy vestnik – Forestry Bulletin*. 2015. Issue 19. vol. 3. pp. 137–144. (In Russ.).
4. Miroschnikov D.U., Simonova E.V. [Distributed multi-agent scheduling of tasks in a group of devices]. *Izvestia Samarskogo nauchnogog centra Eossiiskoi akademii nauk – Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Issue 18. vol. 4(4). pp. 793–798. (In Russ.).

5. Araniti G. et al. Contact Graph Routing in DTN Space Networks: Overview, Enhancements and Performance. *IEEE Communication Magazine*. 2015. pp. 38–46.
6. Birrane E., Burleigh S., Kasch N. Analysis of the contact graph routing algorithm: Bounding interplanetary paths. *Acta Astronautica*. 2012. no. 75. pp. 108–119.
7. Fraire J.A. et al. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2017. vol. 2017. 18 p.
8. Caini C., Firrincieli R. Application of Contact Graph Routing to LEO satellite DTN communications. IEEE International Conference on Communications. 2012. pp. 3301–3305.
9. 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 (IW PSS). 2015. pp. 45–52.
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. Gottfert T. et al. Robust Commanding. Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1808.
12. Wörle M.T. et al. The Incremental Planning System — GSOC's Next Generation Mission Planning Framework. Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1785.
13. Skobelev P.O. [Planning of target application of the earth remote sensing spacecraft group using multi-agent technologies]. *Izvestiya YFU. Tehnicheskiye nauki – Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2015. vol. 10(171). pp. 60–70. (In Russ.).
14. 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. vol. 2. pp. 1160–1176.
15. Herz E. EO and SAR Constellation Imagery Collection Planning. Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1728.
16. Maillard A. et al. Ground and board decision-making on data downloads. Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015. pp. 273–281.
17. Lenzen C. et al. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within in Fire Bird Mission. Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1759.
18. 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.
19. Herz E. et al. Onboard Autonomous Planning System. Proceedings of the 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps AIAA. 2014. pp. 1783.
20. Li J., Chi Y. Planning and Scheduling of an Agile EOS Combining Onground and Onboard Decisions. IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2018. vol. 382. no. 3. pp. 032023.
21. Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K. The EDSN Intersatellite Communications Architecture. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-WS1.
22. Chartres J., Sanchez H., Hanson J. EDSN Development Lessons Learned. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-VI-7.
23. Klushnikov V.Y. [The construction of small satellite clusters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2016. Issue 59(6). pp. 423–428. (In Russ.).
24. Gorodetskiy V.I., Karsaev O.V. [Self-organization of group behavior of small satellites cluster of a distributed surveillance system]. *Izvestiya YFU. Tehnicheskiye nauki – Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2017. vol. 1-2. pp. 234–248. (In Russ.).