

О. В. Карсаев, канд. техн. наук, karsaev@ips-logistic.com,

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург

Методика оценки влияния пропускной способности каналов связи на эффективность функционирования группировки спутников¹

Использование низкоорбитальных группировок малых или сверхмалых спутников для решения задач дистанционного зондирования Земли представляется перспективным направлением развития космической деятельности. Реализация такой перспективы требует изучения широкого круга новых задач, одной из которых является разработка систем управления такими группировками. Принципиально новым аспектом в содержании этой задачи являются возможности использования связи между спутниками и сети связи космической системы в целом. При этом выбор подхода к разработке системы управления зависит от того, в каком режиме может происходить информационный обмен — в режиме реального времени или с временными задержками. В статье рассматриваются различные варианты орбитального построения группировок спутников, предопределяющие режимы информационного обмена. Объектом исследований является космическая система, в которой информационный обмен может происходить с временными задержками. Задачей исследований является разработка методики для оценки влияния пропускной способности сети связи на эффективность функционирования космической системы. Показателями эффективности являются оперативность выполнения заявок и производительность космической системы — объем данных, доставляемый группировкой спутников на Землю в течение определенного периода времени. Основой методики является имитационная модель, в которой моделируется функционирование спутников и объектов наземной инфраструктуры, использование разработанного прототипа системы управления и соответствующий информационный обмен в сети связи.

Ключевые слова: группировка спутников, DTN сеть, CGR маршрутизация, автономное планирование, имитационное моделирование

Введение

Целесообразность использования группировок малых спутников в настоящее время является одним из наиболее актуальных направлений исследований, если не самым актуальным вопросом перспективы развития космической деятельности. Термин "малые спутники" в данном случае используется для краткости и предполагает также рассмотрение группировок из сверхмалых (мини-, макро-, нано-) спутников [1].

Актуальность изучения данного вопроса обусловлена предположениями о том, что группировки малых спутников способны обеспечить эффективное и экономически выгодное выполнение космической деятельности. Сложность изучения вопроса обусловлена тем, что обоснование этих предположений требует проведения большого комплекса междисциплинарных системных исследований.

В данной статье рассматриваются группировки спутников, предназначенные для выполнения задач дистанционного зондирования Земли. При этом в отличие от функционирующих в настоящее время группировок [2–5] будет рассматриваться модель группировки с использованием межспутниковой связи, что предполагает организацию сети связи космической системы, узлами которой являются спутники и наземные станции

управления и приема информации. Наличие такой сети связи открывает новые возможности для построения системы управления группировками спутников, а именно, новые возможности информационного взаимодействия наземных станций с группировками спутников и информационного взаимодействия между спутниками.

Таким образом, объектом исследований в статье является система управления группировкой спутников, в которой используется связь между спутниками. Целью исследований является оценка влияния пропускной способности сети связи на эффективность функционирования космической системы в целом.

Статья организована следующим образом. В первой части рассматриваются возможные подходы к разработке системы управления в зависимости от орбитального построения группировки. Подход к разработке системы управления группировкой принципиальным образом зависит от возможностей сети связи. В связи с этим во второй части рассматривается вопрос организации сети связи при выбранном варианте орбитального построения. Метод планирования съемок в рамках выбранного подхода рассматривается в третьей части. Для проведения экспериментальных исследований использовалась имитационная модель системы управления и функционирования группировки спутников. Описания этой модели и полученных результатов исследований приводятся соответственно в четвертой и пятой частях статьи.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00840).

1. Орбитальное построение группировки спутников

Одной из основных характеристик сети связи, которая должна учитываться при проектировании системы управления, является оперативность информационного обмена. В зависимости от типа орбитального построения группировки информационный обмен может происходить в режиме реального времени или с временными задержками. Режим реального времени возможен только в том случае, если сеть связи космической системы всегда является связанной, т.е. в любой момент времени в текущей топологии существует маршрут передачи данных между любой парой узлов сети. В противном случае информационный обмен происходит с временными задержками. С точки зрения проектирования системы управления можно выделять два фрагмента сети, которые образуются каналами связи "спутник—Земля" и "спутник—спутник". В зависимости от орбитального построения группировки возможны следующие три варианта комбинации оперативности связи в этих фрагментах:

1. В обоих фрагментах сети, т.е. во всей сети в целом, информационное взаимодействие происходит в режиме реального времени. Предполагается, что малые спутники используются на низких орбитах, что требует применения значительного числа спутников. Например, в таких футуристических проектах, как OneWeb и Сфера, предполагается использование 700 и 640 спутников соответственно. Для обеспечения связи в режиме реального времени также могут использоваться геостационарные спутники-ретрансляторы или группировки спутников связи. Информацию о проблемах и перспективах реализации таких проектов можно найти в работе [6].

2. Режим реального времени связи обеспечивается только во фрагменте сети "спутник—спутник", а во фрагменте "спутник—Земля" связь происходит с временными задержками. Такая ситуация, как правило, рассматривается в случае, когда орбитальное построение группировки имеет форму роя. В частности, в одном из первых проектов по отработке информационного взаимодействия, Edison Demonstration of Small Sat Network (EDSN) [7], рассматривалась группировка из восьми спутников, находящихся на расстоянии друг от друга менее 100 км.

3. Информационный обмен в рамках всей сети в целом происходит с временными задержками. Такая ситуация рассматривается в случаях, когда группировка состоит из значительно меньшего числа спутников по сравнению с первым вариантом, а ее построение рассчитывается

исходя из наилучшего покрытия целевых районов наблюдения на основе подходов J. G. Walker [8] и Г. В. Можаяева [9]. Историю развития этих подходов и обзор существующих методов можно найти в работе [10].

В зависимости от оперативности информационного обмена в выделенных фрагментах сети можно говорить о следующих двух обстоятельствах, предопределяющих специфические особенности проектирования систем управления группировки спутников в целом.

Обстоятельство 1. Если во фрагменте сети "спутник—Земля" информационный обмен будет происходить с временными задержками, тогда использование возможностей автономного планирования может обеспечить более высокую эффективность использования ресурсов спутников. Если информационный обмен будет проходить в режиме реального времени, тогда потребность в автономном планировании представляется менее актуальной.

В существующих системах связь со спутником возможна периодически, когда он находится в зоне видимости наземных пунктов управления. При расчете целеуказаний спутнику используются данные о состоянии его ресурсов и выполнении целевых операций, актуальные на момент времени предшествующего сеанса связи. Вследствие этого используются методы планирования, которые не могут обеспечивать использование ресурсов спутника с высокой эффективностью [11—14]. Поэтому в течение двух десятилетий ведутся активные исследования и внедрение в реальную практику возможностей автономного планирования [15—18]. Если же информационный обмен в этом сегменте сети будет происходить в режиме реального времени, то при наземном планировании могут использоваться те же данные, что и на борту спутников при автономном планировании. В этом случае представляется вполне обоснованным дальнейшее развитие и использование традиционных систем наземного планирования [19].

Обстоятельство 2. Если связь между спутниками будет происходить с временными задержками, тогда существуют определенные ограничения на выбор и/или разработку протоколов информационного взаимодействия между спутниками.

Данное обстоятельство можно пояснить на примере протокола CNP (от англ. Contract Net Protocol), который в распределенных системах в большинстве случаев рассматривается в качестве основы организации информационного взаимодействия. Целью взаимодействия в этом протоколе в рассматриваемой предметной области может быть выбор спутника для выпол-

нения съемки целевого района наблюдения [13]. В обобщенном виде схема этого протокола состоит из двух этапов. На первом этапе спутник, инициатор протокола, посылает другим спутникам группировки, респондентам протокола, запросы о возможности выполнения заявки. В ответах на запросы спутники респонденты, в частности, указывают возможный интервал времени проведения съемки. На основе полученной информации спутник-инициатор принимает решение и на втором этапе посылает выбранному спутнику назначение на проведение съемки. Однако, если связь происходит с временными задержками, тогда не исключается ситуация, когда выбранный спутник получит сообщение о назначении выполнения заявки, когда указанный им интервал времени съемки уже прошел. Этот пример показывает, что использование CNP-протокола является возможным только в случае связи в режиме реального времени.

Таким образом, в зависимости от выбора варианта орбитального построения группировки спутников при проектировании системы управления могут рассматриваться различные по содержанию задачи. Далее в статье рассматриваются задачи в случае третьего варианта орбитального построения группировки, так как он представляется наиболее реалистичным.

2. Организация сети связи и маршрутизация сообщений

В рассматриваемом варианте объекты космической системы, спутники и наземные станции, образуют DTN-сеть (от англ. Delay-and-Disruption Tolerant Network), в которой передача данных между узлами происходит с временными задержками, в режиме "сохранить—передать".

Интервалы времени, когда пары узлов сети находятся в зоне радиовидимости, могут рассчитываться на основе моделирования полета спутников группировки. Это обстоятельство используется в основе CGR-метода (от англ. Contact Graph Routing) маршрутизации [20], который активно развивается в течение последнего десятилетия [21—30]. Суть данного метода кратко можно представить следующим образом. Временной график интервалов радиовидимости называется планом контактов, рассчитывается в наземном пункте управления и передается во все узлы сети. В узлах сети по мере возникновения потребности в передаче данных на основе плана контактов рассчитываются графы контактов, которые описывают динамику изменения топологии сети, начиная с текущего момента времени. Вершинами

графа являются контакты, а направленные ребра графа описывают последовательные во времени пары контактов, которые можно использовать для формирования маршрутов. Построение такого "контринтуитивного" графа обеспечивает возможность использования традиционного метода маршрутизации с помощью алгоритма Дейкстры.

Время поиска маршрутов зависит от размерности графа контактов, и с ее ростом использование такого подхода может становиться неприемлемым по времени. Экспериментальный анализ CGR-алгоритма показал, что основное время тратится не столько на поиск маршрутов, сколько на построение графа контактов. В связи с этим в работе [31] была предложена модификация этого алгоритма, CPR-алгоритм (от англ. Contact Plan Routing), реализующий возможность поиска маршрутов на основе плана контактов без построения графа контактов и, тем самым, обеспечивающий сокращение времени маршрутизации на один или два порядка в зависимости от размерности сети.

Интенсивность трафика передачи данных в сети предопределяется интенсивностью потока заявок на выполнение наблюдений и объемом получаемых данных. При этом поток заявок должен формироваться с учетом ограничения пропускной способности каналов связи "группировка спутников—Земля", которое формально можно описать следующим образом. Пусть $V^A(t^*)$ — объем данных, который может быть доставлен на Землю группировкой спутников до момента времени t^* , начиная с текущего момента времени t^0 :

$$V^A(t^*) = \sum_{i=1}^n s(i) d(i),$$

где $s(i)$ — скорость передачи данных и $d(i)$ — длительность каналов связи спутников группировки с наземными пунктами, запланированных на горизонте времени $[t^0, t^*]$. Пусть $V^B(t^*)$ — суммарный объем данных, который ожидается получить при выполнении заявок, посланных группировке спутников на этом же горизонте времени. Тогда при формировании потока заявок должно соблюдаться вполне очевидное ограничение:

$$V^B(t^*) \leq V^A(t^*).$$

Наряду с этим каналы связи между спутниками также имеют ограничение пропускной способности, и в узлах DTN-сети могут возникать заторы, которые можно описать следующим образом. В связи с режимом передачи данных "сохранил—передал" в узлах сети могут возникать очереди сообщений, подлежащих передаче. Оптимальным решением является

передача каждого из этих сообщений по кратчайшему пути. Однако это может становиться невозможным из-за ограничений пропускной способности каналов связи. В этом случае для части сообщений выбираются более длинные маршруты, и, как следствие, увеличивается время нахождения этих сообщений в узле сети и время выполнения заявок в целом.

Таким образом, формирование потока заявок должно происходить с учетом двух рассмотренных ограничений. Однако в отличие от первого ограничения, влияние которого рассчитывается аналитически, оценки влияния второго ограничения могут быть получены только экспериментально на основе имитационного моделирования функционирования группировки спутников и DTN-сети. Результаты этих экспериментов рассматриваются в следующей части статьи после краткого описания схемы функционирования космической системы и используемой в экспериментах имитационной модели.

3. Схема функционирования космической системы

В начальной части статьи было показано, что для рассматриваемого типа орбитального построения группировки повышение эффективности ее функционирования требует использования возможностей автономного планирования работы спутников. При этом также были показаны специфические особенности, которые необходимо учитывать при разработке протоколов информационного взаимодействия. Далее в этом подразделе приводится краткое описание схемы функционирования космической системы, разработанной с учетом этих двух обстоятельств.

В основу предлагаемой схемы положено предположение о том, что основой автономного планирования и информационного взаимодействия являются результаты предварительного наземного планирования, которые сводятся к следующему. По каждой заявке рассчитывается упорядоченная по времени последовательность возможностей выполнения требуемой съемки. Под возможностями понимаются интервалы времени, когда район наблюдения будет находиться в зоне видимости какого-либо спутника группировки.

Использование этих результатов позволяет рассматривать следующую схему информационного взаимодействия и автономного планирования. Каждая заявка первоначально передается по сети спутнику с наиболее ранней возможностью выполнения съемки. При получении заявки на спутнике выполняется автономное планирование, целью которого является оцен-

ка возможности выполнения съемки в рамках соответствующего интервала времени с учетом анализа текущего состояния ресурсов спутника.

В результате автономного планирования может быть получено одно из трех возможных решений: выполнение съемки является возможным, не возможным или возможным за счет переназначения заявки с меньшим приоритетом другому спутнику. В двух последних случаях соответствующая заявка передается спутнику с последующей наиболее ранней возможностью ее выполнения. Детальное описание этой схемы информационного взаимодействия и автономного планирования дано в работе [32].

В предлагаемой схеме потенциально возможные минимальные сроки выполнения каждой заявки обеспечиваются при выполнении двух условий: заявку выполняет первоначально выбранный спутник, и доставка полученных данных на Землю выполняется по кратчайшему маршруту в сети. Нарушение этих условий влечет увеличение сроков выполнения заявок. Возможными причинами нарушения первого условия могут быть: не своевременная доставка заявки первоначально выбранному спутнику, либо случай, когда она оказалась не запланированной или перепланированной вследствие появления заявки с большим приоритетом. Возможной причиной нарушения второго условия может быть невозможность передачи данных по кратчайшему маршруту вследствие возникновения заторов, либо вследствие недостаточности уровня заряда аккумуляторной батареи у какого-то спутника, через который проходит маршрут передачи.

Возникновение заторов является событиями системного уровня. В отличие от них все остальные события являются случайными. Поэтому определение возникновения заторов и оценивание их влияния на эффективность функционирования группировки спутников являлось целью экспериментальных исследований.

4. Имитационное моделирование

Элементами имитационной модели являются модели спутников и объектов наземной инфраструктуры, которые описываются с помощью агентов, имитирующих функционирование физических устройств и/или систем. В частности, модель спутника состоит из агентов системы связи, системы планирования операций, принимающих и передающих устройств, устройства наблюдения и аккумуляторной батареи.

Агенты системы связи на основе плана контактов моделируют установление каналов связи, управляют очередью отправки и маршрутизацией сообщений и данных, в соответствии

с методами и алгоритмами, рассмотренными во второй части статьи.

Агент системы планирования реализует автономное планирование операций наблюдения и перераспределение заявок в соответствии со схемой планирования и информационного взаимодействия, рассмотренной в третьей части статьи. Автономное планирование выполняется с учетом прогноза изменения уровня заряда аккумуляторной батареи.

Агенты принимающих и передающих устройств имитируют, соответственно, прием и передачу сообщений и данных. Агент устройства наблюдения имитирует выполнение запланированных съемок целевых районов. Агент аккумуляторной батареи имитирует изменение текущего уровня заряда по мере выполнения запланированных операций.

План контактов и интервалы времени, когда спутники будут находиться на солнечной стороне орбиты, и будет происходить заряд их аккумуляторных батарей, рассчитываются на основе моделирования полета спутников до начала эксперимента.

Агентно-ориентированное построение модели спутника включает описание схемы обмена данными между агентами. Например, агенты физических устройств, имитирующих выполнение соответствующих типов операций, до начала операции запрашивают агента аккумуляторной батареи о достаточности уровня заряда для выполнения операции и информируют его после выполнения операции для пересчета значения текущего уровня заряда.

5. Результаты экспериментов

Как уже отмечалось во второй части статьи, целью экспериментов было получение оценок влияния пропускной способности каналов связи между спутниками на эффективность функционирования группировки спутников в целом. С этой целью в ходе экспериментов наряду с введенными во второй части статьи показателями $V^A(t^*)$ и $V^B(t^*)$ рассматривались следующие параметры: X — интенсивность потока заявок; $V^C(t)$ — суммарный объем данных, который находится у спутников группировки на момент времени t .

Интенсивность потока заявок X определяется в виде соотношения

$$X = (V^B(t^*) - V^B(t)) / (V^A(t^*) - V^A(t)).$$

Для наглядного пояснения на рис. 1 (см. вторую сторону обложки) приведены примеры графиков рассматриваемых показателей на двенадцатичасовом интервале времени моде-

лирования с 19.12 до 7.12 утра следующего дня. По оси ординат дан объем данных нарастающим итогом в мегабитах:

- потенциал — максимальный объем данных, который может быть передан;
- заявки — объем данных, ожидаемых после выполнения заявок;
- в сети — объем данных, находящихся на спутниках группировки;
- передано — объем переданных данных;
- съемки — объем данных, полученных в результате выполнения заявок.

На рис. 1 введенным показателям соответствуют следующие наименования: V^A — "Потенциал", V^B — "Заявки", V^C — "В сети". В данном случае рассматривается пример, в котором интенсивность потока заявок оценивается как 100 %. На рис. 1 также отображены графики двух дополнительных параметров:

- V^D — "Съемки";
- V^E — "Передано".

Эти дополнительные параметры являются исходными для расчета графика изменений значений показателя V^C :

$$V^C(t) = V^D(t) - V^E(t).$$

Параметр $V^C(t)$ используется с двоякой целью. С одной стороны, динамика изменения его значений во времени является относительной интегральной оценкой возникновения заторов в узлах сети. Чем больше заторов будет возникать в узлах сети, тем больше времени данные будут находиться в узлах сети, и тем больше будет значение этого параметра. С другой стороны, он позволяет выявлять порог интенсивности потока заявок, после которого сеть перестает справляться с передачей текущего трафика. Показателем этого является тренд роста значений этого параметра. Следует также отметить, что существует предельный порог значений этого параметра V^C : суммарный объем памяти спутников. Состояние DTN-сети, при котором значение данного параметра приближается к предельному порогу, называется "остановом сети".

При проведении экспериментов были рассмотрены одна наземная станция и группировка из 16 спутников, имеющая орбитальное построение Walker-delta, заимствованное из работы [30]. Полагалось, что спутники обладают одним приемопередающим устройством, обеспечивающим передачу сигналов на расстояние до 10 000 км. Описание рассчитанного в этом случае плана контактов можно найти в работе [33].

В экспериментах рассматривали скорости передачи данных 300 и 600 Мбит/с и 25 районов наблюдения. Объем получаемых данных при выполнении каждой съемки полагался равным 2 Гбайт. Потоки заявок с интенсивностью

100 % моделировались следующим образом. В случае скорости 300 Мбит/с заявки на съемку каждого из 25 районов наблюдения генерировались через каждый час, в случае 600 Мбит/с — через каждые 30 мин. Для моделирования потоков заявок с интенсивностью менее 100 % генерировались заявки на съемку меньшего числа районов наблюдения.

На рис. 2 и 3 приведены соответственно тренды изменения значений параметра V^C и число заторов, возникающих в сети, при различных интенсивностях потока заявок.

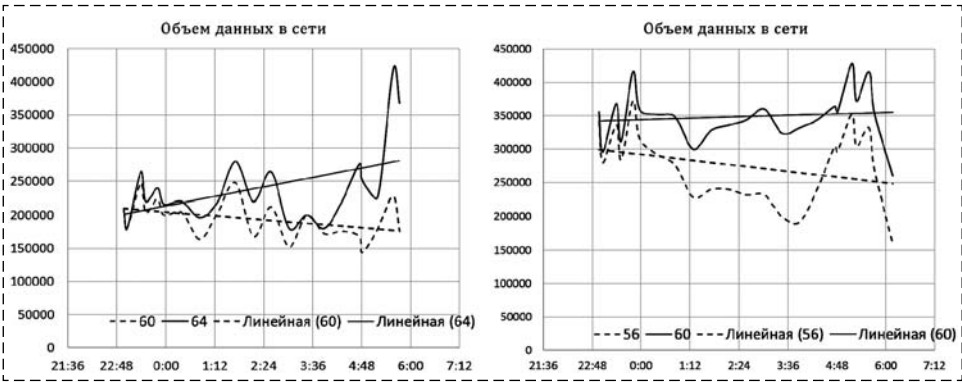


Рис. 2. Скорость нарастания объемов данных в сети (у спутников):

a — 300 Мбит/с; b — 600 Мбит/с

Fig. 2. Rate of data volume growth in the network (for satellites):

a — 300 Mbit/s; b — 600 Mbit/s

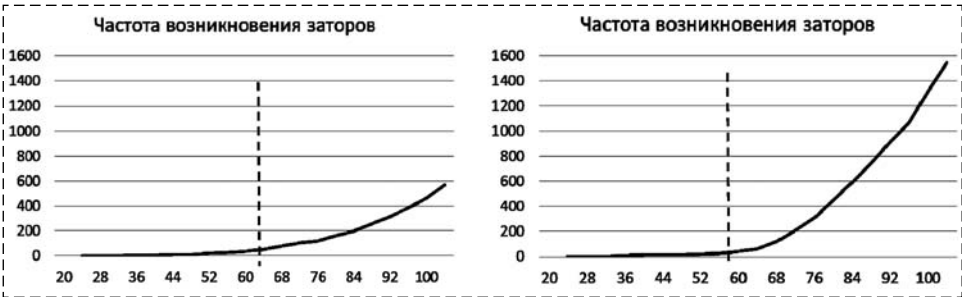


Рис. 3. Оценка числа заторов в сети:

a — 300 Мбит/с; b — 600 Мбит/с

Fig. 3. Estimation of congestion number in the network:

a — 300 Mbit/s; b — 600 Mbit/s

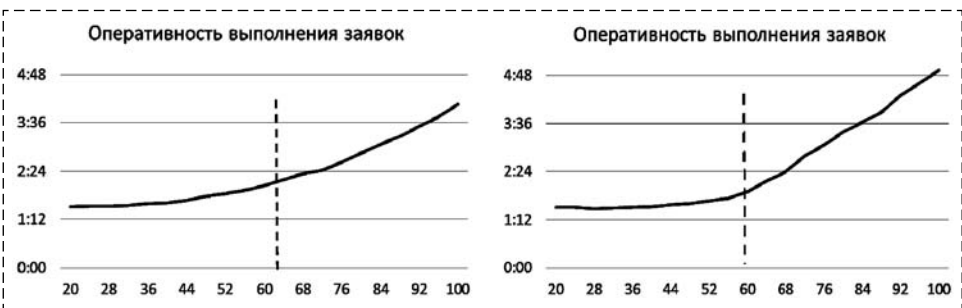


Рис. 4. Оценка оперативности выполнения заявок:

a — 300 Мбит/с; b — 600 Мбит/с

Fig. 4. Assessment of requests execution efficiency:

a — 300 Mbit/s; b — 600 Mbit/s

В ходе экспериментов была выявлена ожидаемая пропорциональная зависимость. Чем выше интенсивность потока заявок, тем выше скорость роста (тренда) показателя V^C . Поэтому на рис. 2 приведены тренды роста показателя V^C при двух значениях интенсивности потока, достаточных для выявления порога, после которого сеть перестает справляться с передачей текущего трафика. При скорости 300 Мбит/с порог возникает на уровне 60...64 % интенсивности потока, при скорости 600 Мбит/с — на уровне 56...60 %.

С учетом выявленных допустимых порогов интенсивности потоков заявок производитель-

ность космической системы — объем данных, доставляемых на Землю в течении часа, — можно оценить с помощью формулы

$$V = v^0 n a,$$

где v^0 — средний объем данных, получаемых при съемке; n — число заявок, генерируемых в течении часа; a — допустимый порог интенсивности потока заявок. В соответствии с этим в рамках условий экспериментов производительность в случаях скорости передачи данных 300 и 600 Мбит/с оценивается соответственно как 30 и 60 Гбайт в час, или 720 и 1440 Гбайт в сутки.

Оценки оперативности выполнения заявок приведены на рис. 4. В качестве оценки оперативности рассматривается среднее время выполнения всех заявок.

Из рис. 4 видно, что в случае потока с интенсивностью ниже выявленного порога сеть обеспечивает квазиоптимальное выполнение заявок. При возрастании интенсивности потока свыше этого порога оперативность выполнения заявок начинает заметно деградировать.

Возможности имитационной модели также позволяют исследовать прочие факторы, представля-

ющие интерес для анализа сети. В частности, на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) приведены оценки использования пропускной способности каналов связи "группировка спутников—Земля".

В данном случае оценки получены при 100%-ной интенсивности потока заявок и скорости передачи данных 300 Мбит/с. Однако данный пример является типовым. В общем случае пропускная способность этих каналов связи используется, как правило, не более, чем на 75...80 %, что частично является следствием возникновения заторов при передаче данных в межспутниковых каналах связи.

Заключение

Как было отмечено во введении, обоснование целесообразности использования группировок малых спутников в перспективе развития космической деятельности в настоящее время является крайне актуальным направлением исследований. Предложенную в данной статье методику и ее дальнейшее развитие можно рассматривать в качестве возможного подхода для конструктивного изучения частных вопросов в рамках данной проблемы.

В случае группировок в отличие от одиночных спутников возникает новый объект управления, который требует разработки новых принципов и подходов к разработке системы управления. Принципиально новым в объекте управления является межспутниковая связь, которая может использоваться для реализации информационного взаимодействия как между спутниками, так и между группировкой спутников и объектами наземной инфраструктуры. Предлагаемая методика позволяет оценивать эффективность функционирования группировки спутников и космической системы в целом в зависимости от пропускной возможности сети в случае, когда орбитальное построение группировки влечет формирование сети связи класса DTN.

Основой предлагаемой методики является имитационная модель функционирования космической системы, в которой можно задавать такие входные параметры, как количественный состав и варианты орбитального построения группировки, количественный состав и географическое расположение объектов наземной инфраструктуры, скорость передачи данных в каналах связи, дальность распространения радиосигналов, число каналов связи, которое может устанавливать приемопередающее устройство. Развитие методики, главным образом, предполагает дальнейшее развитие этой имитацион-

ной модели и описание в ней технических параметров и логики функционирования существующих и/или разрабатываемых перспективных устройств и систем, которые могут рассматриваться в качестве конструктивных элементов спутников. Получаемые в результате имитационного моделирования оценки эффективности функционирования группировки спутников можно будет рассматривать в качестве показателей для решения вопроса о том, использование каких спутников — малых или сверхмалых — представляется более целесообразным и обоснованным.

Список литературы

1. Петрукович А. А., Никифоров О. В. Малые спутники для космических исследований // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, № 4. С. 21—31.
2. Дворкин Б. А. Импортозамещение в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ // Геоматика. 2015. № 1. С. 17—28.
3. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16—36.
4. Лисицын А. Космические системы дистанционного зондирования земли зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2019. № 7. С. 63—67.
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_constellation
6. Mitry M. Routers in space // IEEE Spectrum. 2020. № 2. P. 39—43.
7. Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K. The EDSN Inter Satellite Communications Architecture // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2014. SSC14-WS1.
8. Walker J. G. Satellite constellations // Journal of the British Interplanetary Society. 1984. Vol. 37. P. 559—572.
9. Можжев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем: Теоретико-групповой подход. М.: Машиностроение. 1989. 304 с.
10. Ulybyshev Y. Satellite constellation design for continuous coverage: short historical survey, current status and new solutions // 5th International Workshop on Constellations and Formation Flying. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/304715607_Satellite_constellation_design_for_continuous_coverage_short_historical_survey_current_status_and_new_solutions.
11. Wörle M. T., Lenzen C., Göttfert T., Spörl A., Grischek B., Mrowka F., Wickler M. The Incremental Planning System — GSOC's Next Generation Mission Planning Framework // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations. 2014.
12. Göttfert T., Lenzen C., Wörle M. T., Mrowka F., Wickler M. Robust Commanding // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations. 2014.
13. Van der Horst J., Noble J. Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics // Acta Futura 5. 2012. P. 143—151.
14. 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. 2015. P. 45—52.
15. Maillard A., Pralet C., Jaubert J., Sebbag I., Fontanari F., Hermitte J. Ground and board decision-making on data downloads // Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015.
16. Lenzen C., Wörle M. T., Göttfert T., Mrowka F., Wickler M. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations. 2014.

17. Kennedy A., Marinar A., Cahoy K., Byrne J., Cordeiro T., Decker Z., Marlow W., Shea S., Blackwell W., DiLiberto M., Leslie R. V., Osaretin I., Thompson E., Dishop R. Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2015. SSC15-6-37.
18. Herz E., George D., Esposito T., Center K. Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations. 2014.
19. Chien S., Johnston M., Frank J., Giuliano M., Kave-laars A., Lenzen C., Policella N. A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations. 2012.
20. URL: <https://tools.ietf.org/pdf/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01.pdf>
21. Segui J., Jennings E., Burleigh S. Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking // Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. 2011. P. 1–6.
22. Bezirgiannidis N., Caini C., Montenero D., Ruggieri M., Thaoussidis V. Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications // Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop. 2014. P. 17–23.
23. Birrane E., Burleigh S., Kasch N. Analysis of the contact graph routing algorithm: bounding interplanetary paths // Acta Astronautica. 2012. Vol. 75. P. 108–119.
24. Madoery P., Fraire J., Finochietto J. Congestion management techniques for disruption-tolerant satellite networks // International Journal of Satellite Communications and Networking. 2018. Vol. 36. № 2. P. 165–178.
25. Marchese M., Patrone F. A source routing algorithm based on CGR for DTN-nanosatellite networks // Global Communications Conference, IEEE. 2017.
26. Silva A., Burleigh S., Hirata C., Obraczka K. A survey on congestion control for delay and disruption tolerant networks // Ad Hoc Networks. 2015. Vol. 25. Part B. P. 480–494.
27. Fraire J., Finochietto J. Design Challenges in Contact Plans for Disruption-Tolerant Satellite Networks // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. P. 163–169.
28. Fraire J. Introducing Contact Plan Designer: A Planning Tool for DTN-Based Space-Terrestrial Networks // 6-th International Conference on Space Mission Challenge for Information Technology. 2017. P. 124–127.
29. Madoery P., Fraire J., Raverta F., Burleigh S. Managing Routing Scalability in Space DTNs // 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments. 2018.
30. Fraire J., Madoery P., Burleigh S., Feldmann S., Finochietto S., Charif A., Zergainoh N., Velazco R. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations // Journal of Computer Networks and Communications. 2017. Article ID 2830542. 18 p.
31. Карсаев О. В. Модификация CGR-алгоритма маршрутизации данных в коммуникационной сети группировки спутников // Мехатроника, управление, автоматизация. 2020. Т. 21, № 2. С. 75–85.
32. Карсаев О. В. Автономное планирование задач наблюдения в группировке малых спутников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1. С. 118–132.
33. Карсаев О. В. Анализ оперативности информационных взаимодействий в низкоорбитальных многоспутниковых группировках // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 4. С. 858–886.

Methodology for Evaluating the Impact of Communication Channel Throughput on the Efficiency of Satellite Constellation

O. V. Karsaev, karsaev@ips-logistic.com, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Karsaev Oleg V., Senior Researcher, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: karsaev@ips-logistic.com

Accepted on March 18, 2020

Abstract

The use of low-orbit constellation of small or super-small satellites for solving problems of remote sensing of the Earth is a promising direction for the development of space activities. The implementation of this perspective requires the study of a wide range of fundamentally new tasks, one of which is the development of control systems for such constellations. A fundamentally new aspect in the content of this task is the possibility of using communication between satellites and the communication network of the space system as a whole. At the same time, the choice of approach to the development of the control system depends on the mode in which information exchange can take place, in real time or with time delays. The article discusses various options for the orbital construction of satellite groupings that determine the modes of information exchange. The object of research is a space system in which information exchange can occur with time delays. The aim of the research is to develop a methodology for assessing the impact of the communication network bandwidth on the efficiency of the space system. Efficiency indicators are the time of request execution and the performance of the space system — the data volume delivered by a satellite constellation to the Earth over a certain period. The basis of the methodology is a simulation model that simulates the operation of satellites and ground infrastructure objects, the use of the developed prototype of the control system and the corresponding information exchange in the communication network.

Keywords: Satellite constellation, Delay-and-Disruption Tolerant Networks, Contact Graph Routing, Autonomous scheduling, Simulation

Acknowledgement. The work is supported by RFBR (grant no. 18-01-00840)

For citation:

Karsaev O. V. Methodology for Evaluating the Impact of Communication Channel Throughput on the Efficiency of Satellite Constellation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 9, pp. 544–552.

DOI: 10.17587/mau.21.544-552

References

1. Petrucovich A. A., Nikiforov O. V. Small satellites for space research, *Raketno-kosmicheskoe priborostroeniye i informatsionniye sistemy*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 21–31 (in Russian).
2. Dvorkin B. A. Import substitution in the field of geoinformation technologies and remote sensing of the Earth, *Geomatika*, 2015, no. 1, pp. 17–28 (in Russian).
3. Dvorkin B. A., Dudkin S. A. The newest and perspective satellites of remote sensing of the Earth. *Geomatika*, 2013, no. 2, pp. 16–36 (in Russian).
4. Lisitsyn A. Space systems for remote sensing of the Earth in foreign countries, *Zarubejnoe voennoe obosrenie*, 2019, no. 7, pp. 63–67 (in Russian).
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_constellation
6. Mitry M. Routers in space, *IEEE Spectrum*, 2020, no. 2, pp. 39–43.
7. Hanson J., Sanchez H., Oyadomari K. The EDSN Inter Satellite Communications Architecture, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2014, SSC14-WS1.
8. Walker J. G. Satellite constellations, *Journal of the British Interplanetary Society*, 1984, vol. 37, pp. 559–572.
9. Mojaev G. V. Synthesis of orbital structures of satellite systems: Group-theoretic approach, Moscow, Mashinostroenie, 1989, 304 p. (in Russian).
10. Ulybyshev Y. Satellite constellation design for continuous coverage: short historical survey, current status and new solutions, *5th International Workshop on Constellations and Formation Flying*, 2008, available at: https://www.researchgate.net/publication/304715607_Satellite_constellation_design_for_continuous_coverage_short_historical_survey_current_status_and_new_solutions
11. Wörle M. T., Lenzen C., Göttfert T., Spörl A., Grischkin B., Mrowka F., Wickler M. The Incremental Planning System – GSOC's Next Generation Mission Planning Framework, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations*, 2014.
12. Göttfert T., Lenzen C., Wörle M. T., Mrowka F., Wickler M. Robust Commanding, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations*, 2014.
13. Van der Horst J., Noble J. Task allocation in networks of satellites with Keplerian dynamics, *Acta Futura*, 2012, no. 5, pp. 143–151.
14. 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*, 2015, pp. 45–52.
15. Maillard A., Pralet C., Jaubert J., Sebbag I., Fontanari F., Hermitte J. Ground and board decision-making on data downloads, *Proceedings of 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 2015.
16. Lenzen C., Woerle M. T., Göttfert T., Mrowka F., Wickler M. Onboard Planning and Scheduling Autonomy within the Scope of the Fire Bird Mission, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations*, 2014.
17. Kennedy A., Marinaro A., Cahoy K., Byrne J., Cordeiro T., Decker Z., Marlow W., Shea S., Blackwell W., DiLiberto M., Leslie R. V., Osaretin I., Thompson E., Dishop R. Automated Resource-Constrained Science Planning for the MiRaTA Mission, *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2015, SSC15-6-37.
18. Herz E., George D., Esposito T., Center K. Onboard Autonomous Planning System, *Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations*, 2014.
19. Chien S., Johnston M., Frank J., Giuliano M., Kavelaars A., Lenzen C., Policella N. A generalized timeline representation, services, and interface for automating space mission operations, *Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations*, 2012.
20. Available at: <https://tools.ietf.org/pdf/draft-burleigh-dtnrg-cgr-01.pdf>
21. Segui J., Jennings E., Burleigh S. Enhancing contact graph routing for delay tolerant space networking, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, 2011, pp. 1–6.
22. Bezirgiannidis N., Caini C., Montenero D., Ruggieri M., Thaoussidis V. Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications, *Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop*, 2014, pp. 17–23.
23. Birrane E., Burleigh S., Kasch N. Analysis of the contact graph routing algorithm: bounding interplanetary paths, *Acta Astronautica*, 2012, vol. 75, pp. 108–119.
24. Madoery P., Fraire J., Finochietto J. Congestion management techniques for disruption-tolerant satellite networks, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 165–178.
25. Marchese M., Patrone F. A source routing algorithm based on CGR for DTN-nanosatellite networks, *Global Communications Conference IEEE*, 2017.
26. Silva A., Burleigh S., Hirata C., Obraczka K. A survey on congestion control for delay and disruption tolerant networks, *Ad Hoc Networks*, 2015, vol. 25, Part B, pp. 480–494.
27. Fraire J., Finochietto J. Design Challenges in Contact Plans for Disruption-Tolerant Satellite Networks, *IEEE Communications Magazine*, 2015, vol. 53, pp. 163–169.
28. Fraire J. Introducing Contact Plan Designer: A Planning Tool for DTN-Based Space-Terrestrial Networks, *6-th International Conference on Space Mission Challenge for Information Technology*, 2017, pp. 124–127.
29. Madoery P., Fraire J., Raverta F., Burleigh S. Managing Routing Scalability in Space DTNs, *6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments*, 2018.
30. Fraire J., Madoery P., Burleigh S., Feldmann S., Finochietto S., Charif A., Zergainoh N., Velazco R. Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations, *Journal of Computer Networks and Communications*, 2017, Article ID 2830542, 18 p.
31. Karsaev O. V. Modification of the CGR-algorithm on data routing in a communication network of satellite constellation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 2, pp. 75–85 (in Russian).
32. Karsaev O. V. Autonomous planning of surveillance tasks in a small satellite constellation, *Izvestiya YFU. Tehnicheskie nauki*, 2019, no. 1, pp. 118–132 (in Russian).
33. Karsaev O. V. Analysis of information interaction efficiency in low-orbit satellite constellation, *Trudy SPIIRAN*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 858–886 (in Russian).

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Строминский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 23.06.2020. Подписано в печать 11.08.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН920. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд салюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд салюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru