

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СЕАНСОВ СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОСПУТНИКАМИ И СЕТЬЮ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

П.О. Скобелев¹, А.Б. Иванов², Е.В. Симонова³, В.С. Травин¹, А.А. Жилаев³

¹Институт проблем управления сложными системами РАН

443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия,

тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

petr.skobelev@gmail.com,

²École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Route Cantonale, 1015 Lausanne, Switzerland

anton.ivanov@epfl.ch,

³Научно-производственная компания «Разумные решения»

443013, Самара, Московское шоссе, 17, офисный центр «Вертикаль», офис 1201

simonova@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *микроспутник, наземная станция, мультиагентная система, сеанс связи, онтология, планирование потоков данных, агент*

Abstract

The problem of constructing an effective mechanism for rapid transmission of data between microsatellites and network of ground stations in the dynamically changing environment is considered. Multiagent approach to solving this class of problems is proposed. The ontology, agents, interaction protocols and key benefits of proposed system are discussed.

Введение

Достижения последних лет в области микроэлектроники и микроэлектромеханики позволили снизить массу космических аппаратов, сохранив при этом их целевые характеристики. В результате появился новый класс космических аппаратов, называемых малоразмерными (МКА). За рубежом сложилась устойчивая классификация МКА по их весовым характеристикам: пико-спутники до 1 кг, нано-спутники 1 – 10 кг, микроспутники 10 – 100 кг, мини-спутники 100 – 500 кг, малые спутники 500 – 1000 кг. Уменьшение стоимости и времени, требуемого на разработку и изготовление МКА, обеспечивает создание целых спутниковых систем, способных осуществлять непрерывный мониторинг земной поверхности, решать вопросы навигации и телекоммуникации. Создание группировок МКА способно радикально изменить установившееся представление о роли и месте космических систем и значительно расширить нишу потребительских сервисов по сравнению с реализуемыми в настоящее время [1]. С другой стороны, увеличение числа МКА в орбитальной группировке влечет за собой перегрузку систем управления и необходимость обработки больших объемов целевой информации. В этих условиях наиболее актуальной становится задача планирования своевременной передачи данных с космических аппаратов на наземные станции.

В предлагаемой статье рассматривается содержательная постановка задачи о построении коммуникационной среды для передачи данных от системы микроспутников на наземную территориально распределенную инфраструктуру средств приема и обработки и предлагается ее решение на основе мультиагентных технологий.

1 Постановка задачи

Пусть задан набор микроспутников, принадлежащих различным типам пользователей (например, нескольким университетам, операторам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и др.), ориентирующихся на получение информации от микроспутников, а также на прием и передачу данных на наземные станции. Число микроспутников может меняться с течением времени (часть космических аппаратов выходят из строя, запускаются новые космические аппараты и т.д.). Каждый микроспутник может иметь ограничения технического, организационного, финансового или какого-либо другого характера на передачу информации на наземные станции, принадлежащие разным разработчикам. Таким образом, существует группа доступных для передачи информации станций и группа постоянно (или временно) недоступных станций.

Кроме того, у некоторых наземных станций есть возможность передавать полученную информацию другой станции или использовать ресурсы интернета для доступа заинтересованных потребителей к этой информации. Задание на сброс данных состоит в передаче заданного объема данных с определенного микроспутника в течение заданного интервала времени. Передаче информации на наземную станцию должна предшествовать процедура согласования расписания сеансов связи. Это необходимо для выполнения ряда подготовительных работ на станции, в том числе, для расчета целеуказаний для наведения антенного комплекса на конкретный космический аппарат, подготовки к работе программно-технических средств обработки поступающей информации.

Суть предлагаемой разработки – создать механизм, обеспечивающий микроспутникам возможность передавать данные на систему наземных станций с учетом ограничений, в том числе, возникающих внепланово. Длительность сеансов связи микроспутников с наземными станциями в значительной мере является одним из определяющих факторов, влияющих на производительность наблюдения и оперативность доставки информации. Поэтому оптимизация программы доставки информации на станции непосредственно влияет на эффективность системы в целом.

Задача системы – обеспечить эффективный сброс данных с группировки микроспутников так, чтобы он произошел в требуемое время, с минимальной задержкой от момента получения информации на борту и с учетом текущих ограничений станции по приему. При этом система должна адаптивно корректировать построенное для каждой станции расписание с учетом возникающих событий: изменения расписания съемки на борту микроспутника, выхода его из строя, поломки оборудования станции, запроса от другого потребителя на прием данных от одного из микроспутников и т. п. Если на одной из наземных станций возникли непредвиденные события, его задачи должны быть перераспределены между другими станциями сети.

Задача планирования передачи данных между множеством микроспутников и наземных станций может быть сформулирована следующим образом. Требуется обеспечить максимизацию потока данных Φ в системе N микроспутников на горизонте времени T для M станций:

$$\Phi = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \int rate_{ij}(t) \cdot link_{ij}(t) \cdot schedule_{ij}(t) dt,$$

где $rate_{ij}(t)$ – скорость передачи данных от i -го микроспутника j -й наемной станции, $link_{ij}(t)$ – взаимная эффективность передачи данных от микроспутника к станции, $schedule_{ij}(t)$ – расписание передачи данных, построенное с учетом взаимной видимости станций и микроспутников.

Таким образом, решение поставленной задачи требует согласованного планирования работ в сети станций и микроспутников.

2 Описание мультиагентного подхода к решению задачи

Основой для решения поставленной задачи могут выступать мультиагентные технологии, позволяющие решать сложные проблемы за счет самоорганизации конкурирующих и кооперирующихся агентов [2, 3].

При планировании сеансов связи используется концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), в которой любой план строится как гибкая (перестраиваемая по событиям) сеть связей агентов потребностей (задач) и возможностей (ресурсов). В основе лежит принцип совместной заинтересованности всех участников в решениях, выгодных как для каждого из них, так и для системы в целом. При этом ухудшение положения одного из участников может, в интересах группы, компенсироваться за счет других участников, если оно приводит к выигрышу группы в целом.

Основные принципы предлагаемого мультиагентного подхода адаптивного планирования могут быть сформулированы следующим образом:

- Поток данных для передачи на землю от каждого микроспутника можно представить в виде задачи с определенным временем начала, предельным временем завершения, объемом и приоритетом.
- Каждая задача и наземная станция получают своих программных агентов, у которых ведется собственное расписание.
- Агент задачи определяет требования и ограничения на планирование в соответствии со своей трудоемкостью и предпочтительными сроками исполнения.
- Если при попытке планирования подходящая наземная станция оказывается занятой другой задачей, фиксируется конфликт и начинаются переговоры по его разрешению путем подвижек во времени или перемещения задач на другие станции.
- Решающим правилом для утверждения изменения плана является условие превосходства суммы всех улучшений над суммой всех ухудшений, вызванных новым событием, в интересах сети в целом по выполнению большего числа работ.
- Даже после решения своей задачи каждый агент не останавливается, а продолжает пытаться улучшить свое положение (пока есть время для решения задачи).

Таким образом, итоговый план строится как динамическое равновесие интересов агентов задач и станций, которые ведут переговоры о своем положении в расписании сети и планируют свою работу за счет сдвигов, исходя из допустимых отклонений моментов начала выполнения задач от предпочитаемого времени.

3 Разработка мультиагентной системы планирования

Для учета специфики предметной области и особенностей задачи планирования потоков данных между множеством микроспутников и наземных станций была разработана структура онтологии, фрагмент которой приведен на рисунке 1. Согласно этой структуре, каждая наземная станция обладает собственным расписанием, в котором отражаются уже запланированные сеансы связи с микроспутниками и график работы станции. Каждый сеанс связи характеризуется приоритетом, продолжительностью, статусом выполнения и интервалом времени, в течение которого он должен быть осуществлен. Проведение сеансов связи возможно только в определенные временные интервалы, в течение которых между микроспутником и станцией сохраняется прямая видимость.

Каждой наземной станции сопоставляется агент ресурса. Цель агента ресурса – наиболее плотное планирование работ с предпочтением планирования задач «своих» микроспутников и обеспечение минимизации простоя оборудования. Каждому сеансу связи ставится в соответствие агент задачи. Цель агента задачи – разместиться на лучшей для него наземной станции, параметры которой удовлетворяют ограничениям задачи. Агент задачи способен реагировать на события добавления/удаления новых наземных станций и отмены размещения других за-

дач. Регистрация и отмена задач производится специальным агентом сцены, отвечающим за взаимодействие с пользователем системы.

Для учета стоимостной компоненты вводится виртуальный рынок агентов, в котором все характеристики процессов выражаются через виртуальные денежные эквиваленты. У каждого агента задается целевая и штрафная функция. Целевая функция отражает удовлетворенность агента в зависимости от достижения поставленной перед ним цели. Штрафная функция задает денежную премию или санкцию за то или иное значение целевой функции. Она позволяет также задать допустимые для планирования интервалы значений, где это необходимо, путем выставления заведомо неприемлемой величины штрафа в областях недопустимых значений.

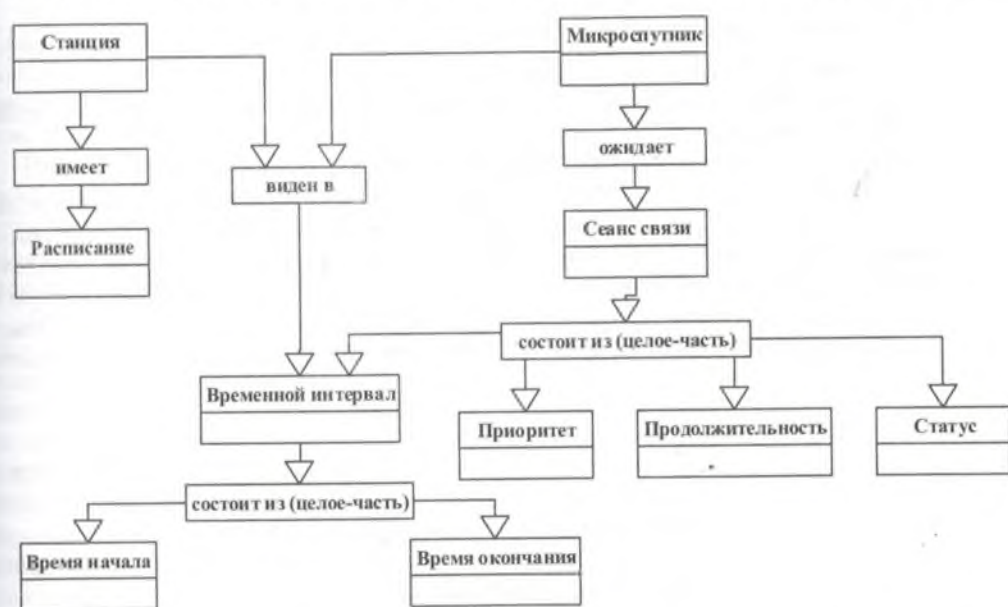


Рисунок 1 – Фрагмент онтологии мультиагентной системы планирования сеансов связи

Каждый агент пытается максимизировать свою удовлетворенность и увеличивает прибыль, которую может тратить как «энергию» для подвижки других агентов, в случае возникновения конфликтов, которые он пытается разрешить в интересах системы в целом. Задача планирования решается итерационно, за счет постепенного возрастания (локального улучшения) значений целевых функций каждого агента.

При инициализации задачи ей выдается начальная, соответствующая ее приоритету, сумма виртуальных средств. Эти средства могут быть использованы в качестве платы за размещение на выбранном ресурсе, а также для компенсации издержек сдвигаемых при размещении задач. Целевая функция (ЦФ) и штрафная функции агента задачи строятся с учетом временных ограничений на сроки ее выполнения, агента ресурса – с учетом его загруженности на рассматриваемом интервале планирования (рисунок 2).

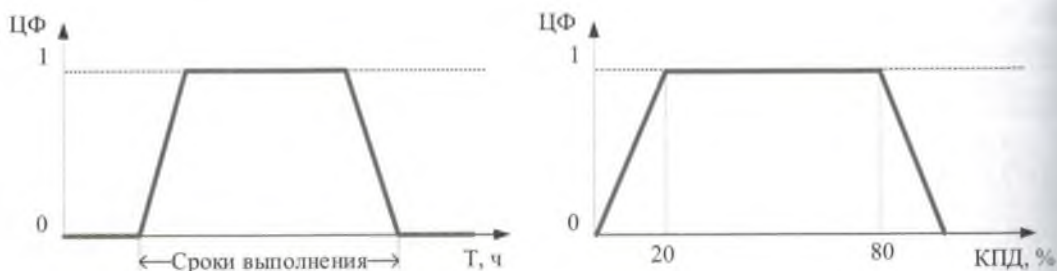


Рисунок 2 – Пример целевой функции задачи (слева) и ресурса (справа)

Процесс планирования включает два этапа:

- 1) Первоначальная инициализация размещения задач на ресурсах с учетом предпочтений и временных ограничений;
- 2) Проактивное улучшение прибыли со стороны задач за счет перепланирования.

Протокол взаимодействия агентов при первоначальной инициализации размещения задачи показан на рисунке 3. Данный протокол является реализацией Contract Net Interaction Protocol, специфицированного стандартом FIPA [4]. Агент появившейся задачи определяет список агентов доступных и подходящих для размещения наземных станций, после чего отправляет каждому из них сообщение-запрос *CFP* (*Call for Proposal*), в котором указывается имя спутника и интервал времени, в течение которого необходимо запланировать сеанс связи.

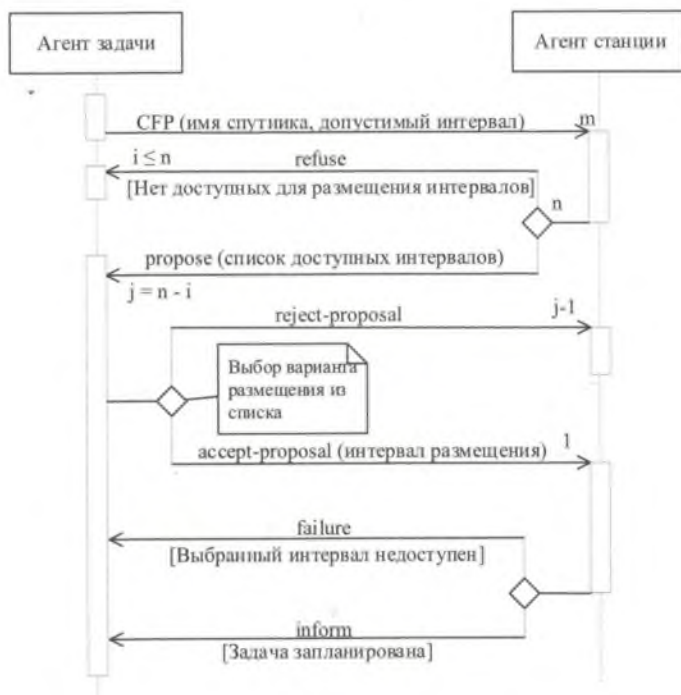


Рисунок 3 – Протокол взаимодействия агентов при появлении новой задачи

Каждый агент наземной станции, получивший это сообщение, производит анализ интервалов видимости указанного микроспутника в рамках указанного интервала времени. Так как вычисление интервалов видимости между микроспутником и станцией является достаточно ресурсоемкой операцией, расчет производится только по соответствующему запросу. Из полученного списка возможных интервалов размещения задачи вычитаются те промежутки времени, в течение которых станция занята выполнением других задач в соответствии со своим расписанием. Если доступные для размещения интервалы не найдены, агент станции отправляет ответное сообщение *refuse*, в противном случае – сообщение *propose*, содержащее список доступных интервалов.

Дождавшись всех ответных сообщений, агент задачи определяет лучший в соответствии со своей целевой функцией вариант размещения, после чего отправляет предложившему этот вариант агенту станции сообщение *accept-proposal*. Это сообщение содержит определяемый задачей интервал планирования, зависящий от времени начала и продолжительности сеанса связи. Всем остальным агентам станций отправляется сообщение *reject-proposal*.

Получив сообщение *accept-proposal*, агент станции производит проверку указанного в нем интервала планирования на занятость другими задачами. Если интервал свободен, отправляется ответное сообщение *inform*, агент ресурса получает плату за размещение, а информация о задаче заносится в расписание. В противном случае отправляется сообщение *failure*, получив которое, агент задачи пытается разместиться на другом ресурсе.

Далее в действие вступает алгоритм проактивного улучшения удовлетворенности агентов задач. Первым процесс улучшения начинает агент задачи с наименьшим значением целевой функции. Проактивная задача опрашивает подходящие ей ресурсы, определяя стоимость размещения на отдельных участках расписания. Среди задач, запланированных на рассматриваемом интервале времени, выбираются две ближайшие: с левой и правой стороны от середины интервала планируемой задачи. Агентам этих задач отправляется запрос сдвига на указанное время. Рекурсивное перемещение затрагиваемых сдвигом задач продолжается до тех пор, пока очередная сдвигаемая задача не сможет беспрепятственно переместиться на новую позицию, у вытесняющей задачи остаются средства на компенсацию всех издержек, или не станет равным нулю счетчик, ограничивающий глубину рекурсии. Из всего множества возможных точек размещения исключаются те варианты, утверждение которых не позволит улучшить значение целевой функции системы, из оставшихся вариантов выбирается наилучший.

Задача, оставшаяся незапланированной, помещается в очередь ожидающих планирования задач. Очередная попытка планирования этих задач будет предпринята в случае возникновения событий добавления новых или изменения расписания уже существующих ресурсов.

Разрабатываемая система развивает модели, методы и алгоритмы, разработанные ранее для мультиагентной системы управления группировкой МКА [5], в которой поступающие задачи ДЗЗ адаптивно распределялись между МКА с различными техническими возможностями.

Заключение

Предложенный подход к планированию сеансов связи позволит добиться высокой оперативности, гибкости и эффективности в работе сети микроспутников и станций, в особенности, при априорной неопределенности в изменениях спроса и предложения на услуги микроспутников и наземных станций и высоком уровне динамики в возникновении непредвиденных событий. Динамическое формирование и поддержание адекватного согласованного всеми участниками расписания в процессе переговоров агентов задач и станций позволит учитывать меняющиеся внешние условия, связанные с изменением условий передачи данных, параметров орбит, отказом оборудования микроспутников, перегрузкой каналов связи и др. Кроме того, работа микроспутников и станций станет прозрачной для всех участников, позволит сократить трудоемкость планирования и уменьшить ошибки, вызванные человеческим фактором, повысит надежность создаваемой техники.

Список литературы

- [1] Л.А. Макриденко, К.А. Боярчук. Микроспутники. Тенденции развития. Особенности рынка и социальное значение. – Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/102/2.pdf>
- [2] Витих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78-87.
- [3] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1, – С. 1–32.
- [4] Foundation for Intelligent Physical Agents – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=710>
- [5] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16–26.