УДК 629.78

Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли

А. В. Соллогуб,

докт. техн. наук, профессор

ГНП РКЦ «ЦСКБ – Прогресс», г. Самара

П. О. Скобелев,

докт. техн. наук, внс

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Е. В. Симонова,

канд. техн. наук, доцент

А. В. Царев,

генеральный директор

М. Е. Степанов,

разработчик

А. А. Жиляев,

разработчик

ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», г. Самара

Рассматривается распределенный подход к решению задачи управления групповыми операциями кластера малых космических аппаратов. Предлагается классификация кластеров. Описывается интеллектуальная система управления группировкой космических аппаратов, разработанная на основе мультиагентных технологий и онтологий. Приводятся результаты экспериментальных исследований моделей групповых операций малых космических аппаратов, показывающие преимущества разработанного подхода.

Ключевые слова — кластер малых космических аппаратов, интеллектуальная система управления, мультиагентные технологии, распределенное решение задач, объект зондирования, межспутниковые коммуникации, эффективность.

Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tsarev A. V., Stepanov M. E., Zhilyaev A.A.

Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for Earth remote sensing.

Distributed problem solving for cluster of small satellites is considered. Classes of clusters is proposed. Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for Earth remote sensing is presented. Results of simulations and key benefits of developed system are discussed.

Keywords — small satellites cluster, intelligent system for managing satellites, distributed problem solving, multi-agent technology, communication of satellites, efficiency.

Введение

Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу предусматривает приоритетное развитие и целенаправленную государственную поддержку технологий дистанционного зондирования Земли. Предусмотрено развертывание до 2015 года минимально необходимого состава орбитальной группировки космических аппаратов связи, дистанционного зондирования Земли и навигации с использованием отработанных в полете и серийно изготавливаемых космических аппаратов [1].

До настоящего времени подходы, применяемые к управлению традиционными космическими аппаратами (КА), носят «централизованный» и «статический» характер, когда для каждого спутника предполагается определенный наперед заданный порядок выполнения задач, передаваемый с Земли. Для управления группировкой малоразмерных КА предлагается парадигма «распределенного динамического» управления, когда задачи ставятся не только отдельным КА, но и всей группировке КА в целом. Данный подход позволяет динамически перераспределять задачи внутри группировки путем переговоров между аппаратами непосредственно в процессе выполнения этих задач, причем в такой системе могут возникать заранее не запланированные события, например, появление новой срочной задачи, выход из строя одного из аппаратов, вывод на орбиту нового аппарата и др.

Для решения рассматриваемой задачи предлагается концепция «интеллекта роя» (*swarm intelligence*), активно развиваемая в последнее время в применении к

малоразмерным спутникам [2]. Группировки нано и пико спутников, подобные рою пчел, могут быть многофункциональными и гибко конфигурируемыми под задачи, дешевыми в исполнении, надежными и живучими в самых различных ситуациях при наблюдении Земли, исследовании объектов в космосе, решении телекоммуникационных и разнообразных других задач [3–4].

В статье рассматривается интеллектуальная система коллективного управления группировкой спутников, построенная на основе применения баз знаний и мультиагентных технологий [5], принципы создания которой были изложены ранее [6–11]. Кратко описывается разработанная система и приводятся результаты экспериментальных исследований, полученные в ходе моделирования, показывающие новые возможности гибкого и адаптивного планирования работы взаимодействующих аппаратов группировки в условиях априорной неопределенности и высокой динамики возникновения непредвиденных событий. Разработанный подход открывает широкие перспективы создания самоорганизующихся систем управления сложными объектами, пригодных для решения целого спектра новых задач в аэрокосмических приложениях.

Прежде всего, рассмотрим возможные виды кластеров для решения задач дистанционного зондирования Земли и сценарии их использования.

Виды кластеров космических аппаратов

В разрабатываемом нами подходе предполагается, что космическая система зондирования (КСЗ) включает следующие кластеры:

- кластер видового зондирования (КВЗ),
- кластер радиолокационного зондирования (КРЛЗ),
- кластер радиотехнического зондирования (КРТЗ),
- кластеры малых близко расположенных КА (МКА),
- кластер связных КА, расположенных на геостационарных орбитах (например, развёртываемая российская многофункциональная космическая система ретрансляции (МКСР) «Луч») [12].

Кроме того, при работе КСЗ используются созвездия космических аппаратов (КА) глобальных навигационных спутниковых систем *GPS* и ГЛОНАСС.

Кластер видового зондирования

Различают следующие сценарии (разновидности) видового зондирования:

1. По конфигурации объектов зондирования (ОЗ):

– объектовое (ОЗ размещается в пределах одного кадра),
– азимутальное (ОЗ представляет собой прямолинейный маршрут),
– маршрутное (ОЗ представляет собой криволинейный маршрут),
– площадное (ОЗ представляет собой поверхность на земном шаре).

2. По решаемым целевым задачам:

– оперативное зондирование (максимально возможная оперативность зондирования складывается из минимизации времени выхода КА на ОЗ и доставки информации зондирования потребителю),
– планово-периодическое или обзорное зондирование (зондирование определённых районов через определённые промежутки времени),
– зондирование в интересах картографирования земной поверхности (разработка топографических карт, привязка ОЗ к географическим координатам, построение земельного кадастра),
– стереоскопическое зондирование (стереосъёмка) для получения 3D-изображений.

3. По разрешающей способности изображения:

– детальное зондирование,
– высокодетальное зондирование,

4. По спектральной чувствительности аппаратуры зондирования:

– панхроматическое зондирование (чёрно–белые снимки с высоким разрешением),
– спектральное,
– многоспектральное,
– гиперспектральное зондирование (снимки местности в определённых спектральных диапазонах, получение цветных изображений).

Пространственное разрешение наиболее важно для указанных ниже задач зондирования:

– обнаружение и распознавание класса ОЗ,
– определение типов ОЗ,
– распознавание конкретного образа ОЗ,

– определение геометрических характеристик ОЗ (контуры, размеры, структура, составные элементы),
– определение состояния ОЗ.

Кластер радиолокационного зондирования

Объекты радиолокационного зондирования подразделяются на сосредоточенные и распределённые объекты. К сосредоточенным относятся объекты, размеры которых меньше, чем размеры разрешаемого радиолокационной станцией (РЛС) объёма. Сосредоточенные объекты делятся на одиночные и групповые. Групповые объекты состоят из набора независимых одиночных объектов. Одиночные сосредоточенные объекты также называют точечными. К распределённым объектам относятся земные и водные поверхности, размеры которых превышают размеры разрешаемого элемента.

Различают следующие методы радиолокационного визирования земной поверхности [13]:

1. Пассивное визирование состоит в приёме и анализе собственного теплового излучения объектов и сред, а также рассеянного ими солнечного излучения в диапазонах от видимого и инфракрасного (ИК) — до СВЧ–радиодиапазона (ИК и СВЧ–радиометры).

– СВЧ–радиометры находят применение при прокладке трасс магистральных трубопроводов, обнаружении нефтяных пятен на суше и водной поверхности, утечке газа, мониторинге ледовой обстановки, определении состояния морской поверхности, контроле вулканической деятельности, мониторинге атмосферы, почв, лесных и сельскохозяйственных угодий и др.
– ИК–системы находят широкое применение в различных областях человеческой деятельности (медицине, геологии, военной области и др.). В частности, в военной области – это тепловые системы самонаведения ракет, сканирующие системы тепловой разведки местности, обзорные системы для поиска и обнаружения военных объектов: кораблей, самолётов, ракет, танков, подводных лодок, скопления людей и техники.

2. Активное визирование состоит в измерении характеристик рассеяния радиоволн различными видами земной поверхности. Для активного визирования используются следующие виды аппаратуры:

- активные РЛС–скаттерометры — скаттерометры, устанавливаемые на КА, используются для получения с периодичностью в 2-3 суток глобальной карты ветров на земной поверхности, определения морского волнения, исследования растительного покрова и других свойств земной поверхности.
- радиовысотомеры космического базирования – устанавливаются на всех КА и служат для определения высоты полёта КА над Землёй.
- радиолокаторы с синтезированным раскрывом антенны (РСА) — в отличие от оптических систем, работа РСА не зависит от освещённости зондируемой поверхности и состояния атмосферы, т.е. может выполняться в любое время суток, при любой облачности и погоде, позволяя достичь высокого разрешения по поверхности. Кроме того, в РСА можно получить дополнительную информацию, изменяя длину радиоволн и вид поляризации.
- радиолокаторы подповерхностного зондирования — георадары.

Активные методы радиолокации в дециметровом, метровом и декаметровом диапазонах позволяют обеспечить проникновение радиоволн в грунт и произвести анализ параметров неглубоких подповерхностных слоёв для измерения их толщины, обнаружения подповерхностных пустот.

Кластер радиотехнического зондирования

Радиотехническое зондирование — вид зондирования, целью которого является сбор и обработка информации, получаемой с помощью радиоэлектронных средств, о радиоэлектронных системах по их собственным излучениям, и последующая их обработка с целью получения информации о положении источника излучения, его скорости, наличии данных в излучаемых сигналах, смысловом содержании сигналов.

Данные, получаемые КРТЗ, могут быть доступны другим потребителям посредством внутренних каналов связи и могут образовывать так называемое «информационное поле», что позволяет более эффективно анализировать текущую обстановку.

Системы КРТЗ могут использоваться для получения каких-либо данных путем съема и расшифровки параметров электромагнитного излучения с телефонных кабельных и абонентских линий, радиорелейных каналов, кабелей компьютерных

сетей, излучения аппаратуры, работающей с информацией (мониторов, компьютеров и т.д.), перехвата радиообмена и т.д.

В целях разработки и исследования методов коллективного управления подвижными объектами в группировках КА, состоящих из спутников различных типов зондирования, разработана интеллектуальная система (ИС), использующая мультиагентные технологии [8].

Интеллектуальная система управления группировкой космических аппаратов

Данная ИС предназначена для решения нового класса задач планирования поведения интеллектуальных подвижных объектов, способных действовать как полностью автономно, так и коллективно, путем объединения в группы или команды («рои»). К таким задачам относится область управления роем миниатюрных роботов-спутников различных типов зондирования, предназначенных для дистанционного и сигнатурного зондирования Земли (ДЗЗ/СЗЗ) [6-7]. Разработана мультиагентная технология и технология представления знаний (онтологий), позволяющих создавать самоорганизующиеся команды взаимодействующих интеллектуальных объектов, самостоятельно принимающих решения и способных их согласовывать и координировать.

Интеллектуальная система управления группировкой КА представляет собой глобальную пространственно распределённую сеть, агенты (узлы) которой либо совершают вращение вокруг Земли (КА ДЗЗ, КА–ретрансляторы), либо, находясь на поверхности Земли, вращаются вместе с ней (ОЗ, центры обработки данных (ЦОДы)), либо совершают своё движение в соответствии с законами небесной механики (Земля, Солнце, звёзды).

Каждый агент–МКА может автономно определять свои координаты в пространстве в любой момент времени, имеет в своём составе устройства двусторонней связи с другими агентами, что позволяет обмениваться с ними сообщениями. Ниже приведен перечень агентов и выполняемые ими функции:

- агент ЦОД — выдача задания и получение результатов исследования,
- агент шеф (спутник-инициатор) — сбор и отправка в ЦОД результатов исследования цели,

- агент инспектор — обнаружение цели и принятие решения о привлечении к ее исследованию спутников других типов зондирования,
- агент кандидат — исследование цели в соответствии с полученным от спутника-инициатора заданием и возврат результата шефу.
- агент ретранслятор — обеспечение коммуникации между спутниками при отсутствии взаимной прямой видимости, ретрансляторы находятся на геостационарной орбите.

Созданная ИС основана на использовании метода согласованного взаимодействия коллектива подвижных агентов, в котором промежуточные спутники (агенты) выполняют функции ретрансляции и доставки сигнала для других спутников к заданному месту решения задачи, а спутники, приближающиеся к зоне действий, динамически формируют команду, состоящую из кластеров КА и одиночных КА, распределяют между собой поставленную задачу и решают ее по частям, в зависимости от своей позиции и возможностей, имеющегося на борту оборудования и других параметров. При этом задачи и роли каждого объекта в группе определяются в распределенном взаимодействии динамически, в реальном времени, причем могут адаптивно изменяться при изменении ситуации [8].

Основными компонентами архитектуры и технологической платформы ИС коллективного управления подвижными объектами являются модули создания онтологий и сцен, а также модуль динамического планирования, формирующий план обработки потока входных событий (заявок на обнаружение целей, выходов из строя оборудования и пр.) и осуществляющий динамическое адаптивное изменение созданного плана.

На рис. 1 показано окно редактора онтологии ИС. Онтология предназначена для описания знаний, используемых агентами при решении сложных задач управления группировкой подвижных объектов. В онтологии описываются основные составляющие системы слежения (объект, который должен быть обнаружен, регион слежения, центр обработки данных, спутники, орбиты, по которым перемещаются спутники) в виде взаимосвязанных концептов, атрибуты, описывающие эти концепты, и основные взаимозависимости между концептами. Все эти знания используются агентами в процессе переговоров.

В левой части экрана представлена иерархия понятий предметной области в виде дерева концептов. Классы концептов организованы в иерархию на принципах наследования. Концепт характеризуется свойствами (атрибутами). В правой части экрана онтология представлена в виде семантической сети, где узлы отображают концепты, а ребра – отношения между концептами. Редактор онтологии выполняет следующие функции:

– добавление/удаление, редактирование концептов, атрибутов, отношений;
– добавление/удаление, редактирование правил распознавания целей, правил принятия решений о передаче управления и т.п.;
– навигацию по семантической сети онтологии с различным уровнем детализации представления.

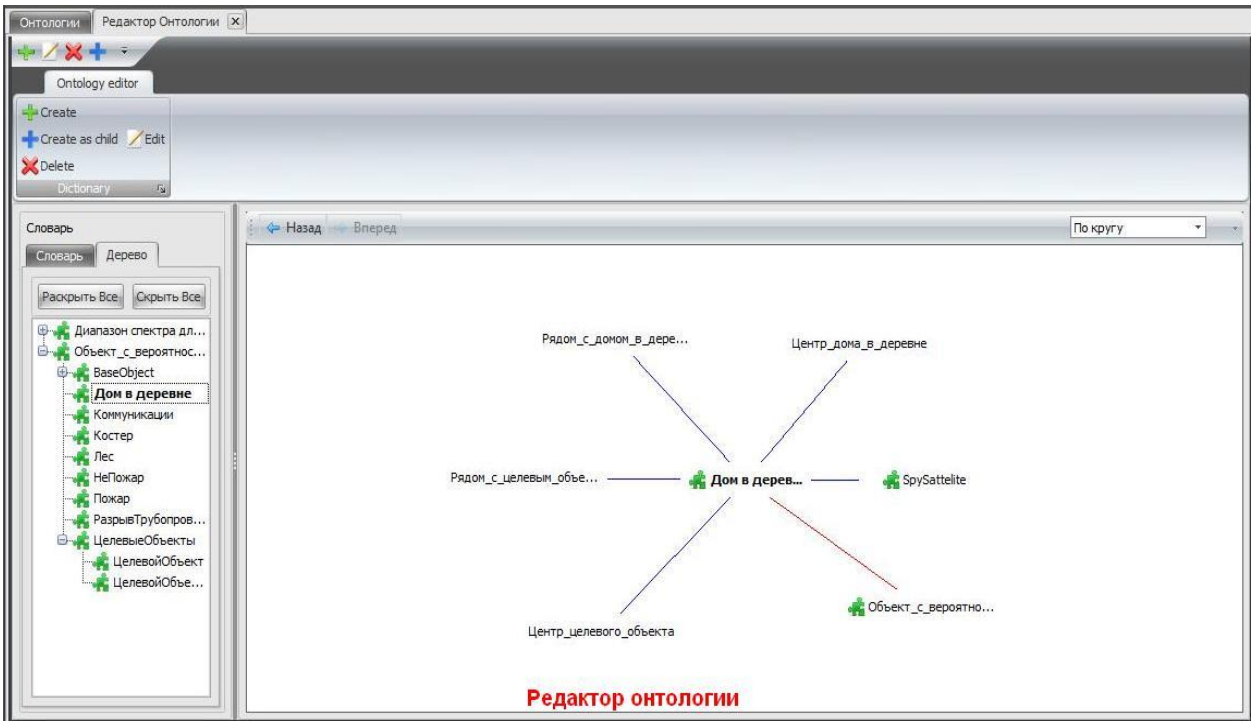


Рис. 1. Окно редактора онтологии ИС

На основании онтологического описания ОЗ спутник, получивший запрос на исследование цели, выделяет концепты, соответствующие его спектру видимости, выполняет зондирование в своем диапазоне и отправляет запросы на исследование спутникам, которые принадлежат кластерам других типов зондирования, если необходимо. Сравнивая несколько онтологических описаний ОЗ, спутник может обнаруживать изменение состояния ОЗ.

На рис. 2 показан основной экран системы динамического планирования (моделирования). Система моделирования предназначена для создания и редактирования сцен на основе онтологии, а также для моделирования процесса слежения за целью с использованием заданной сцены.

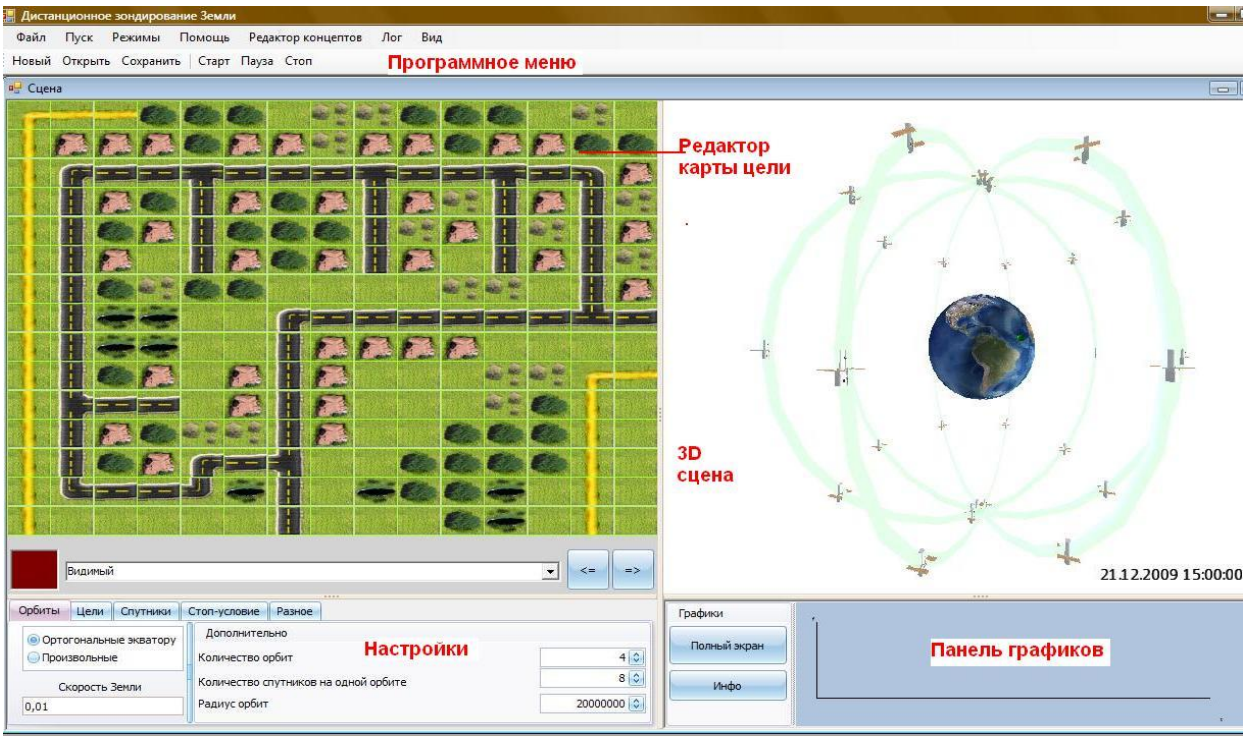


Рис. 2. Основной экран системы моделирования ИС

В верхней части экрана расположено программное меню. В правом верхнем поле экрана находится настраиваемая 3D сцена, отображающая группировку спутников, их перемещения, процесс слежения за целью, перемещение видимой цели, передаваемые сообщения, тип кластера, в который входит спутник. Цель – область на Земле, за которой должен следить рой спутников. В левом верхнем поле экрана расположена настраиваемая карта местности. Она содержит характеристики цели, за которой следят спутники. Задача группировки спутников — обнаружить заданный в онтологии объект и передать информацию в ЦОД. В нижней правой части экрана расположена панель графиков, предназначенная для отображения циклограммы, содержащей периоды, когда цель находится под наблюдением или без наблюдения, а также графика исследований, отображающего период от обнаружения ОЗ до его полного исследования в различных диапазонах. В нижней левой части экрана находятся панели настроек моделирования.

Система динамического планирования (моделирования) предоставляет следующую функциональность:

- настройка и редактирование основных параметров системы моделирования: ЦОДов (координаты), объектов зондирования (координаты, спектральные характеристики, скорость перемещения), спутников (координаты, тип зондирования, угол обзора, диапазон радиодоступа, тип межспутниковой коммуникации, помехоустойчивость, принадлежность к орбите и др.), орбит (радиус, большая и малая полуоси, наклонение, аргумент перигея, эксцентриситет, долгота восходящего узла, количество спутников на орбите и др.); на рис. 3 показано окно настроек объекта зондирования с указанием региона наблюдения, приоритета, интервала времени исследования, на рис. 4 показаны настройки параметров спутника;
- визуализация процессов ДЗЗ с помощью 3D сцены: отображение процесса слежения спутника за целью, передачи эстафеты слежения, коммуникации между спутниками, смены дня и ночи;
- отображение информации по регионам поиска целей, характеристикам спутников (одиночных и кластеров), участвующих в обнаружении целей,
- распознавание целей на основе реальных аэрокосмических снимков, полученных из карты *Google Earth*;
- отображение параметров агентов через инспектор агентов и лог сообщений между агентами, уровень детализации сообщений регулируется с помощью фильтров;
- визуализация результатов моделирования групповых операций кластера КА при решении задач ДЗЗ.

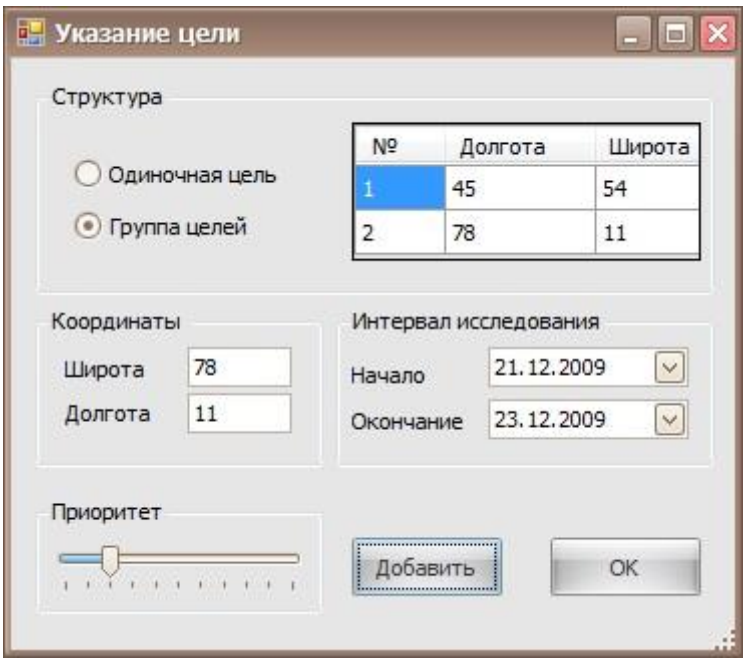


Рис. 3. Окно настроек параметров объекта зондирования (цели)

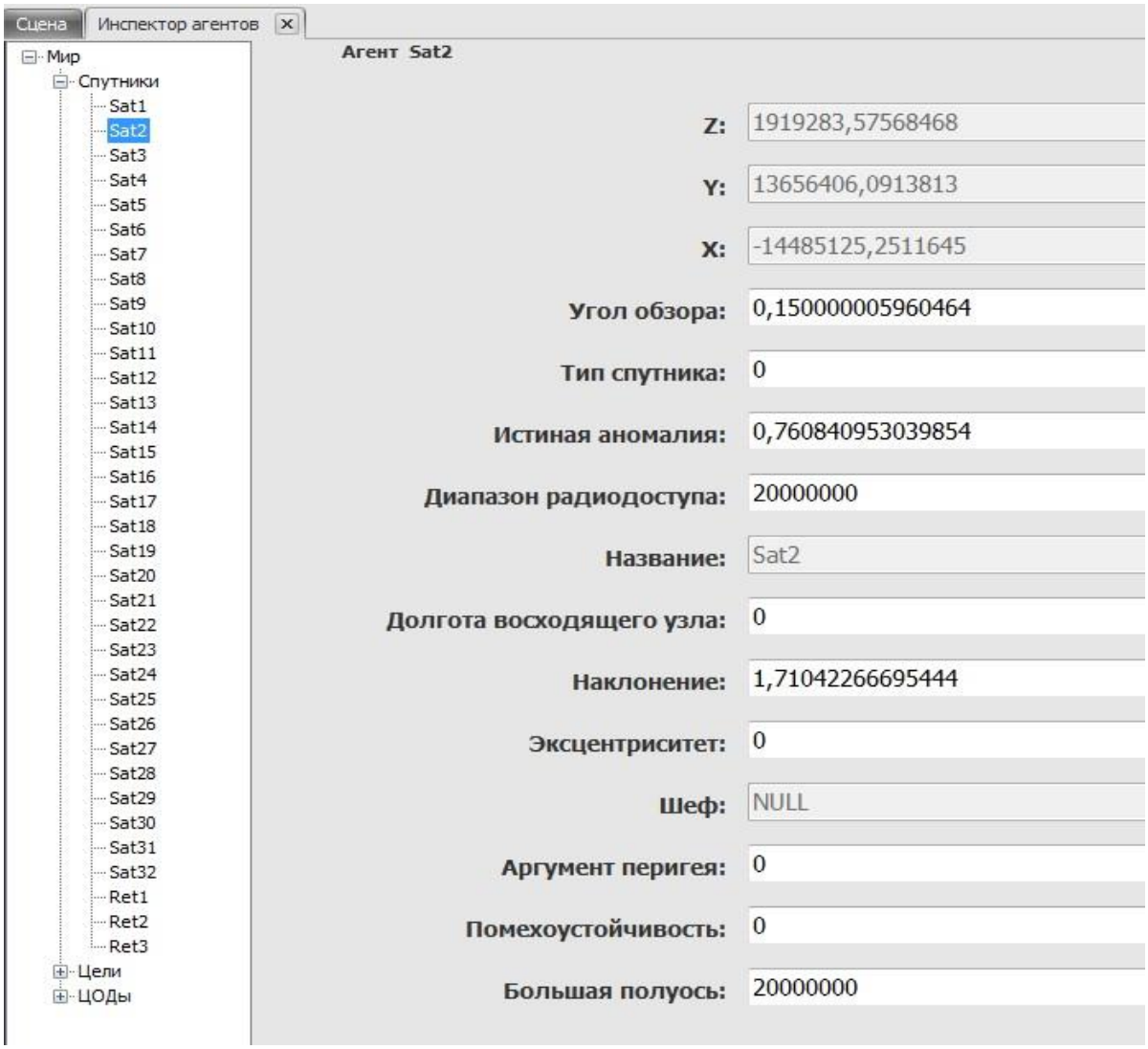


Рис. 4. Окно настроек параметров спутника

На рис. 5 показана циклограмма наблюдения ОЗ, на которой отображается угловое расстояние от спутника до ОЗ. Наблюдение возможно в периоды, когда угловое расстояние принимает значения ниже линии, ограничивающей предельный угол наблюдаемости цели. Для удобства отображается также смена дня и ночи. На рис. 6 показан развернутый график слежения за целью, на котором отображается период от обнаружения ОЗ до его полного исследования в различных диапазонах, выделенных цветом.

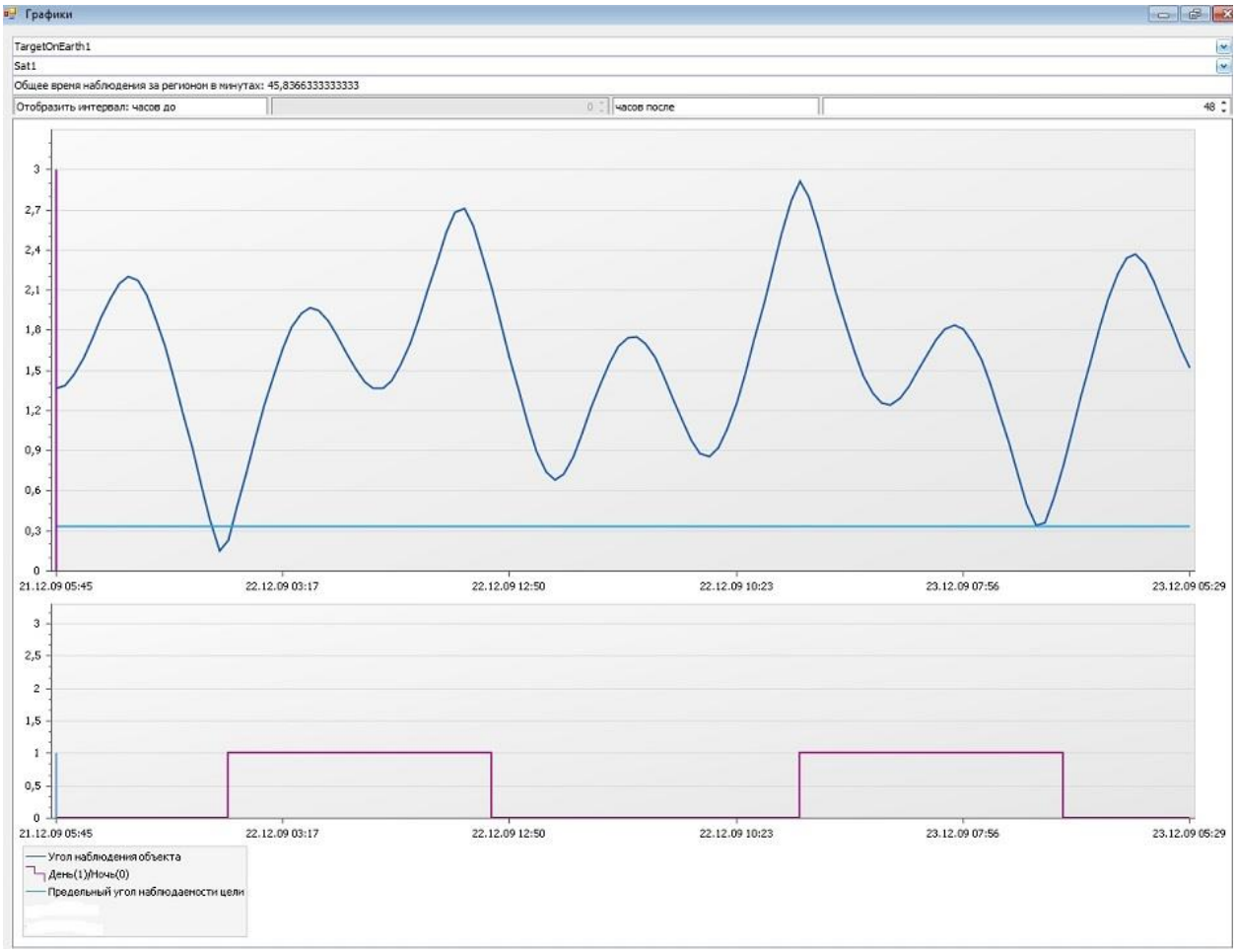


Рис. 5. Циклограмма наблюдения объекта зондирования

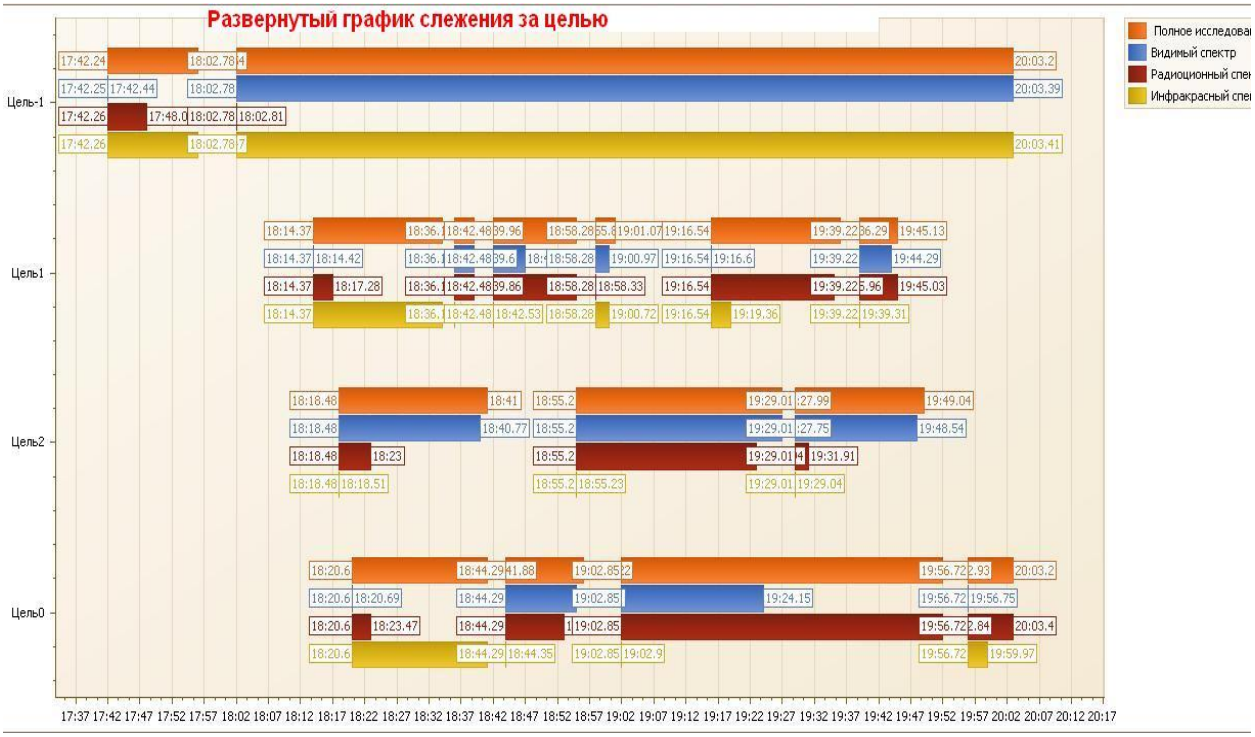


Рис. 6. Развернутый график слежения за целью

Модели управления групповыми операциями в кластере МКА, основанные на онтологическом описании, можно рассматривать как элементы «встроенной самоорганизации» систем управления кластером в гетерогенных МАС МКА ДЗЗ, не имеющих регулярной структуры [9-11].

3 Экспериментальные исследования моделей групповых операций МКА

Эксперименты в ИС проводятся в соответствии со следующими условиями. Вся имеющаяся группировка КА может быть разбита на кластеры различных видов в соответствии с решаемой задачей, например:

– кластер, объединяющий КА одного типа зондирования, расположенные таким образом, чтобы в сумме покрывать наибольшую площадь поверхности Земли, но при этом сохранять взаимную видимость для коммуникации;
– кластер, объединяющий КА разных типов зондирования, расположенные максимально близко друг к другу.

Каждому спутнику известны орбитальные параметры всех спутников из кластера, в который он включен. Каждый спутник может входить в один или более кластеров. Принадлежность спутника к кластеру отображается на 3D сцене (рис. 2).

Каждому спутнику поставлен в соответствие пул задач, т.е. один спутник одновременно может работать с несколькими целями. В пуле содержится информация о заданиях, полученных спутником от ЦОДа или от спутников-инициаторов. В процессе перемещения по орбите спутник способен просматривать имеющийся пул задач и приступать к исследованию ближайшей цели.

Спутники могут участвовать в переговорах между собой и с ЦОДом. При этом различаются переговоры с точки зрения управления и с целью передачи информации. Для обеспечения коммуникации между спутниками при отсутствии у них взаимной прямой видимости используются ретрансляторы — специальные коммуникационные спутники, расположенные на геостационарной орбите. Протокол передачи сообщений с использованием ретрансляторов предусматривает следующие этапы:

1. Проверка наличия прямой видимости между спутником-отправителем и спутником-получателем.
2. В случае отсутствия такой видимости производится «упаковка» — создание нового сообщения-обертки, включающего в себя передаваемое сообщение. Это позволяет ретрансляторам передавать любой тип сообщений.
3. Передача сообщения ближайшему ретранслятору.
4. Проверка наличия прямой видимости между ретранслятором и спутником-получателем.
5. В случае отсутствия прямой видимости передача сообщения другим ретрансляторам до тех пор, пока видимость не будет установлена.
6. Отправка сообщения спутнику-получателю.
7. «Распаковка» сообщения.

Примеры задач и сценариев зондирования

1 Построение цепочки МКА, обеспечивающей максимально продолжительное покрытие интервала исследования ОЗ

В данном примере показывается возможность моделирования рационального распределения заданий на исследование ОЗ между спутниками.

Пусть задано 6 спутников, которые могут взаимодействовать между собой. В начальный момент времени ЦОД специфицирует и передает задачу на поиск целевого объекта ближайшему спутнику, находящемуся в зоне его видимости.

Получив задание от ЦОДа, МКА ретранслирует его тем спутникам, которые смогут обеспечить максимально продолжительное покрытие интервала исследования, заданного для каждого ОЗ. На рис. 7 показан лог сообщений, соответствующий передаче задания трем спутникам. Агент Спутника 1 в ответ на получение задачи из ЦОДа, отправляет в ЦОД подтверждение о приеме цели. После исследования характеристик цели агент Спутника 1 принимает решение о передаче цели Спутникам 16, 18 и 29, обеспечивающим максимально продолжительное покрытие интервала исследования цели. Агенты данных спутников подтверждают получение цели.

	Сообщение	Отправитель	Получатель	Цель
>	Принимаю цель.	Спутник 1	ЦОД1	Цель 1
	Принимаю цель.	Спутник 16	Спутник 1	Цель 1
	Принимаю цель.	Спутник 18	Спутник 1	Цель 1
	Принимаю цель.	Спутник 29	Спутник 1	Цель 1

Рис. 7. Лог сообщений

При выборе цепочки МКА учитывается общее время наблюдения цели конкретным спутником, за исключением того промежутка времени, когда цель видима для другого, уже выбранного (включенного в цепочку), спутника. Это позволяет исключить возможность одновременного выбора тех спутников, которые видят ОЗ в одно и то же время. Пример выбора цепочки МКА показан на рис. 8.

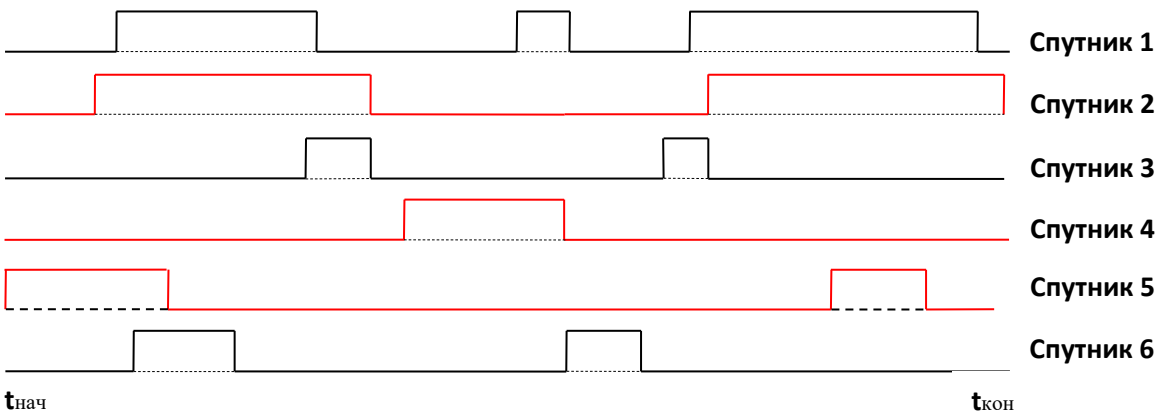


Рис. 8. Диаграмма видимости ОЗ различными МКА

На рис. 8 вдоль оси времени, ограниченной интервалом исследования ОЗ, отложены участки видимости ОЗ указанными спутниками. Наибольшую

продолжительность покрытия интервала имеет Спутник 2. Он и будет выбран в первую очередь. Далее к цепочке будут добавлены Спутник 4 и Спутник 5. Спутник 1, несмотря на продолжительное по времени покрытие цели, включен в цепочку не будет, так как он в целом дублирует работу Спутника 2. Цепочка МКА выделена на рисунке красным цветом.

2 Одновременное зондирование группы ОЗ различными МКА. Распределение задач между спутниками

Если необходимо исследовать группу целей (ОЗ), создается кластер МКА, находящихся в различных регионах, но выполняющих общую задачу. Группа будет считаться исследованной по окончании исследования всех целей, входящих в неё.

Т.к. один и тот же спутник может быть выбран для исследования сразу нескольких целей, при планировании следует отдавать предпочтение вариантам с более равномерным распределением нагрузки между спутниками. Получение спутником новой цели может привести к необходимости пересмотра его плана исследования ОЗ. Перепланирование осуществляется в два этапа:

1. Определение цели, которую следует попытаться передать.
2. Поиск спутника, наиболее подходящего для исследования этой цели.

На первом этапе выполняется сравнение характеристик целей, входящих в пул задач КА, на втором — переговоры между агентами спутников и определение критерия — величины, количественно измеряющей степень пригодности спутника для исследования конкретной цели. Критерий представляет собой свертку нескольких факторов. Степень зависимости критерия от того или иного фактора регулируется с помощью весовых коэффициентов, знак которых определяется видом зависимости критерия от фактора (прямая, обратная зависимость):

- время видимости цели спутником (положительный коэффициент),
- время, в течение которого исследование цели актуально (отрицательный коэффициент),
- загруженность спутника другими задачами (отрицательный коэффициент),
- приоритет цели (положительный коэффициент).

Все факторы оказывают различное влияние на критерий. Например, чем меньше времени осталось до окончания исследования цели, тем выше должно быть значение величины критерия.

В начальный момент времени ЦОД специфицирует и передает задачу на поиск целевого объекта цепочке из нескольких спутников. Получив задачу, спутник помещает ее в свой пул задач. При этом проверяется текущий уровень загрузки спутника, определяемый количеством находящихся в пуле целей. Если этот уровень выше установленного в системе значения, спутник инициирует процесс перепланирования.

Из всех задач, входящих в пул спутника, выбирается та, для которой значение критерия минимально. На основании данных о выбранной цели формируется специальное сообщение, рассылаемое всем ближайшим спутникам. Получив такое сообщение, спутники отправляют ответ, в котором содержится информация об имеющихся у них возможностях для исследования данной цели, представленная в виде значения заданного выше критерия. Спутник, инициирующий передачу задания, получив ответы от всех оповещенных КА, выбирает среди них наиболее пригодный и пересылает ему задание. Если ни один из опрошенных спутников не смог предложить лучших условий исследования, задача остается у инициатора, но к ее выполнению он приступает только после завершения работы с более приоритетными с точки зрения критерия целями. При этом задача исключается из пула спутника. Процесс перепланирования повторяется до тех пор, пока количество целей в пулах задач спутников превышает некоторое заданное значение.

В данном алгоритме используется комбинация централизованного и распределенного подходов к планированию, что позволяет существенно сократить число межспутниковых коммуникаций, так как переговоры используются только при возникновении конфликтных ситуаций.

Для реализации примеров, рассматриваемых далее, используем следующую модель группировки спутников. Пусть в ДЗЗ участвуют 32 МКА и три спутника-ретранслятора, находящихся на геостационарной орбите. КА размещаются по 8 единиц по четырем орбитам, расположенным перпендикулярно экваториальной плоскости, и повернутым относительно друг друга на 90 градусов. По первой орбите перемещаются спутники кластера радиотехнического зондирования, по второй орбите — спутники кластера видового зондирования, по третьей орбите — спутники кластера радиолокационного зондирования, по четвертой орбите — спутники разных типов.

3 Использование переговоров при планировании задач ДЗЗ

Задача состоит в исследовании нескольких близкорасположенных целей, число которых в разных сериях экспериментов изменяется от 1 до 6. Во всех испытаниях максимальное число одновременно исследуемых спутником целей равно двум.

В ходе эксперимента было проведено 2 группы по 30 испытаний:

1. при получении трех и более целей спутник пытается передать их другому КА, т.е. после первоначального централизованного распределения проводится перепланирование, осуществляемое посредством переговоров между спутниками;
2. при получении трех и более целей спутник откладывает их выполнение до того, как будет выполнено исследование уже имеющихся целей, т.е. выполняется резервирование без переговоров.

При этом множество испытаний дополнительно разбивается на 6 серий, различающихся по количеству имеющихся на сцене целей.

В табл. 1 приведены полученные в ходе эксперимента значения времени (в часах модельного времени), затраченного на исследование всех целей. Для каждой серии испытаний приведены значения среднего арифметического $\bar{x}$ и среднеквадратического отклонения σ времени исследования целей.

Табл. 1. Оценки времени планирования задач ДЗЗ с использованием переговоров и без переговоров

	Число целей	1	2	3	4	5	6
$\bar{x}$	Резервирование	42.8	57.4	66.6	103	103.8	130.8
$\bar{x}$	Переговоры	43.6	57.8	59.4	86.8	90.6	117.2
σ	Резервирование	2.79	2.5	1.6	8.97	18.08	25.48
σ	Переговоры	3.07	1.72	2.5	3.76	3.61	13.47

Графическое представление результатов эксперимента (среднее арифметическое значение выборок) при использовании переговоров и без переговоров показано на рис. 9.

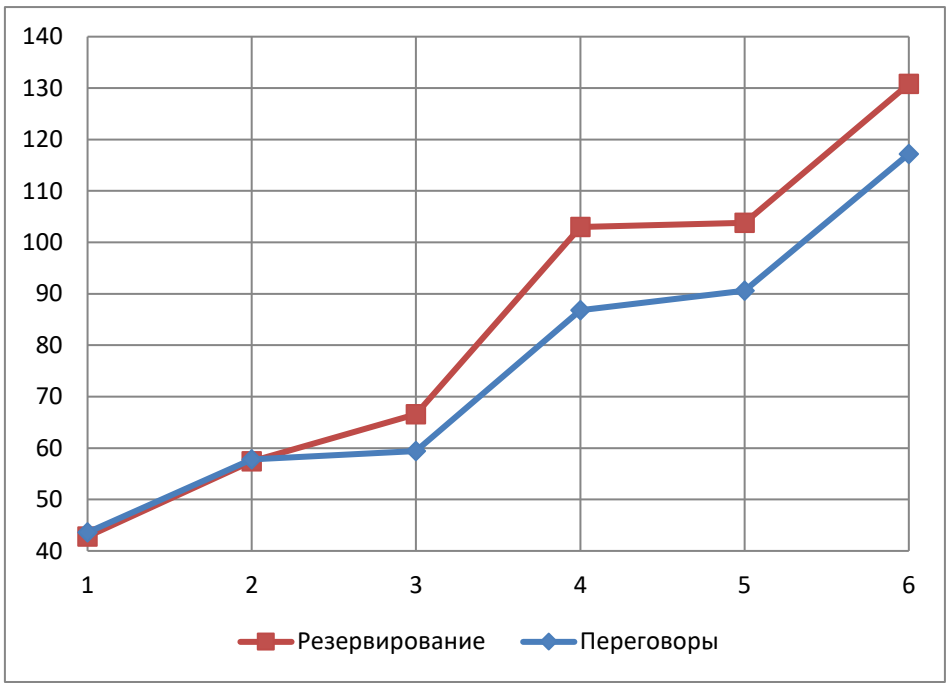


Рис. 9. Графическое представление результатов эксперимента по оценке времени планирования задач ДЗЗ

На основании результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. При наличии только одной или двух целей ограничение на максимальное число исследуемых спутником целей не задействовано (является неактивным). Поэтому результаты испытаний в этом случае при переговорах и резервировании совпадают.
2. Наилучший эффект от применения переговоров (экономия времени 16.2 часа) достигается при 4 целях на сцене. В этом случае удается найти еще свободные спутники, обеспечивающие достаточно продолжительную видимость цели. При дальнейшем увеличении количества целей на сцене и сохранении ограничения на максимальное число исследуемых спутником целей равным двум, поиск свободных спутников затрудняется и чаще всего не приводит к результату.
3. Использование переговоров позволяет существенно снизить среднеквадратическое отклонение величины времени, затраченного на исследование целей. При этом общее время выполнения задач ДЗЗ становится более определенным и лучше прогнозируемым.

Эффект от применения переговоров, выраженный в количестве целей, исследованных за один и тот же интервал времени, показан на рис. 10.

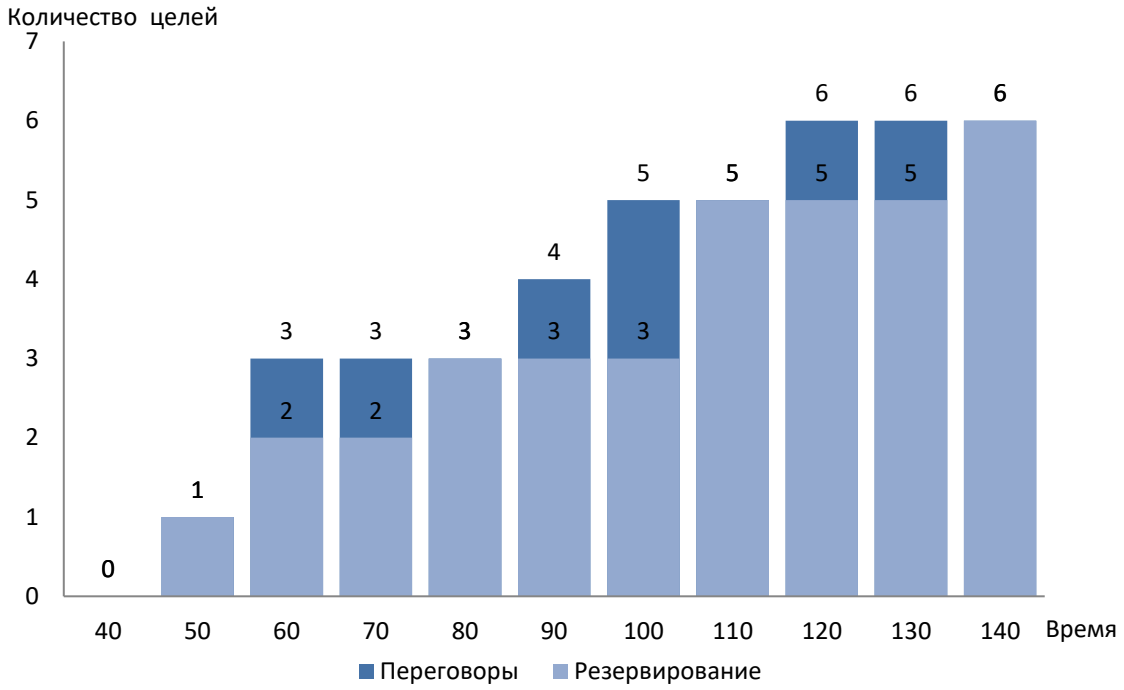


Рис. 10. Гистограмма количества исследованных целей

Гистограмма на рис. 10 показывает, что за один и тот же интервал времени группировка КА при использовании переговоров может исследовать большее число целей, чем без переговоров.

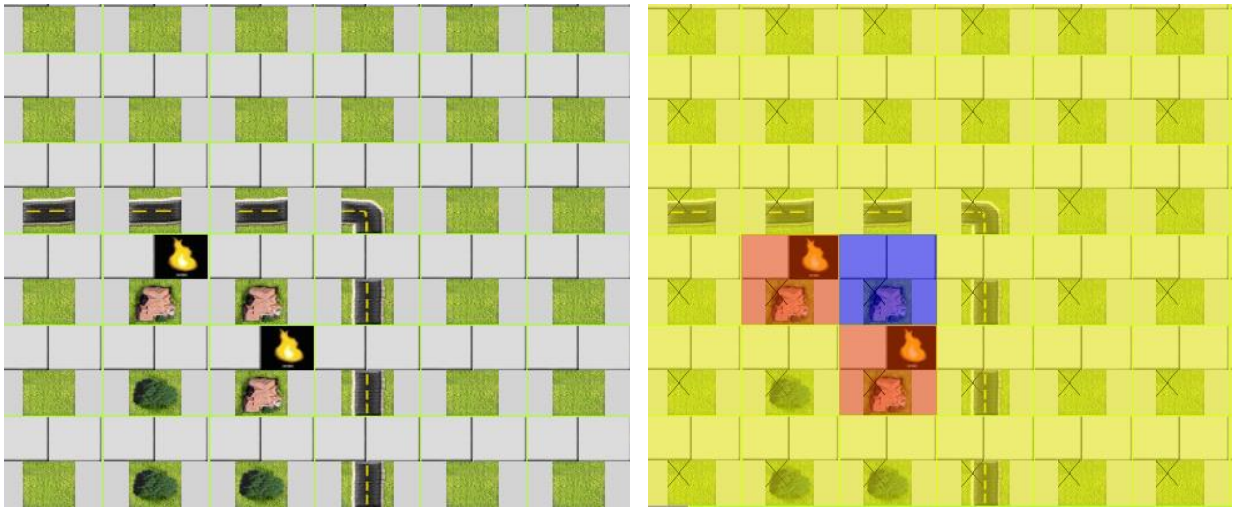
4 Сравнение продолжительности исследования ОЗ при передаче информации с помощью ретрансляторов и через ЦОД

В системе имеется возможность моделировать различные способы коммуникации между спутниками:

1. передача сообщений напрямую от спутника к спутнику без привлечения посредников, если между спутниками нет препятствий и расстояние между ними не превышает заданного значения,
2. передача через ретрансляторы,
3. передача сообщений через наземные центры обработки данных (ЦОД). Так как ЦОДы расположены на поверхности Земли неравномерно, то последний способ связан со значительными временными задержками.

Задача ДЗЗ в данном сценарии — обнаружение горящего дома в деревне. Зондирование выполняют спутники, принадлежащие кластерам видового и радиолокационного зондирования. Задача состоит в исследовании объекта при двух различных способах коммуникации: через ЦОД и через ретрансляторы. Карта

местности и результат исследования ОЗ представлены на рис. 11 (рис. 11 б) различными цветами выделены квадраты, исследованные спутниками соответствующих типов зондирования).



а) карта местности б) результат исследования ОЗ

Рис. 11. Обнаружение горящего дома

В ходе эксперимента были проведены две серии опытов по 30 испытаний в каждой серии. В первой серии экспериментов исследовалась продолжительность обнаружения объекта при передаче информации с коммуникацией посредством спутников-ретрансляторов. Во второй серии исследовалась продолжительность обнаружения объекта при передаче информации через центр обработки данных (ЦОД).

В табл. 2 и на рис. 12 приведены полученные в ходе эксперимента значения времени (в часах модельного времени), затраченного на исследование цели.

Табл. 2. Результаты эксперимента по определению продолжительности исследования ОЗ

Тип опыта \ № испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Через ретрансляторы	44	49	46	49	69	51	65	37	35	63
Через ЦОД	102	120	65	90	140	121	89	129	75	55
Тип опыта \ № испытания	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Через ретрансляторы	49	57	37	44	67	38	55	51	47	39
Через ЦОД	78	134	114	65	100	75	79	101	58	81

Тип опыта \ № испытания	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Через ретрансляторы	56	41	54	48	61	38	51	44	68	59
Через ЦОД	71	117	84	149	122	65	106	83	94	126

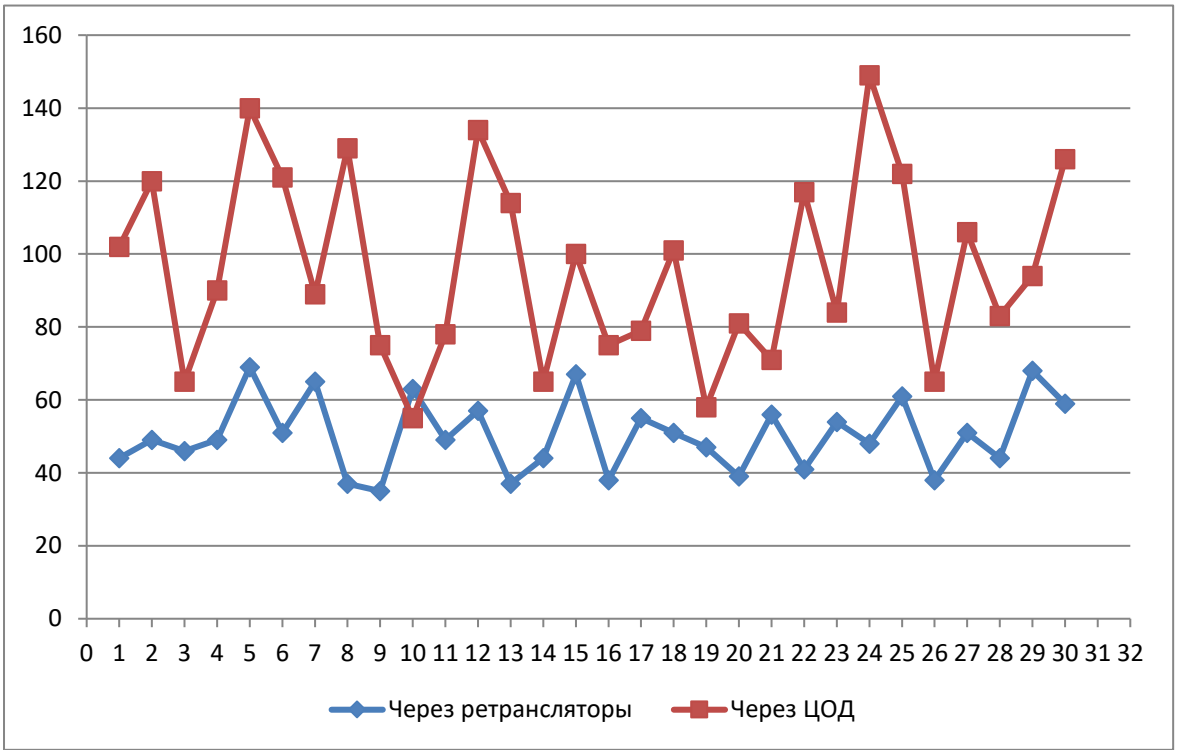


Рис. 12. Графическое представление результатов эксперимента по определению продолжительности исследования ОЗ

Сравнение продолжительности исследования объекта при передаче информации с коммуникацией с помощью ретрансляторов и через ЦОД показало, что если запрос на исследование объекта передается через ЦОД, то для полного обследования необходимо в среднем 96.27 часов модельного времени, т.е. в 1.9 раза больше, чем с использованием коммуникации посредством ретрансляторов (в среднем 50.4 часов модельного времени).

При передаче информации через ЦОД среднеквадратичное отклонение величины затраченного времени составило 26 часов, а в случае с коммуникацией через ретрансляторы — 10 часов. Следовательно, использование ретрансляторов уменьшает среднеквадратическое отклонение величины затраченного времени в 2.6 раза.

Различия в математическом ожидании и среднеквадратическом отклонении величины затраченного на исследование времени связаны с тем, что при

коммуникации через ЦОД на продолжительность обнаружения влияет не только взаимное расположение объекта и орбит спутников, но и расположение ЦОДа. Так, если объект и ЦОД сильно удалены друг от друга, то для передачи информации спутнику необходимо затратить дополнительное время на перемещение по орбите.

5 Сравнение энергозатрат группировки спутников при различных способах коммуникаций

В данном сценарии используется параметр спутника — затраты энергии на передачу одного сообщения при различных способах коммуникации, а также реализована возможность выбора доступных для спутника способов коммуникации:

- передача напрямую или через ретрансляторы,
- передача только через ретрансляторы.

Цель эксперимента — оценить общие затраты энергии группировки спутников при проведении исследования, заключающегося в обнаружении горящего дома в деревне согласно сценарию, описанному выше.

Затраты энергии при передаче сообщения напрямую приняты равными 5 условным единицам, а через ретрансляторы — 10 условным единицам. В ходе эксперимента было проведено 30 испытаний, различающихся как по разрешенным способам коммуникации, так и по количеству целей на сцене. В табл. 3 и на рис. 13 приведены полученные в ходе эксперимента значения суммарных энергозатрат группировки.

Табл. 3. Результаты эксперимента по сравнению энергозатрат группировки КА при различных способах коммуникаций

Способ коммуникации	№ опыта \ Кол-во целей	1	2	3	4	5
Прямой и через ретрансляторы	1	105	155	235	305	350
	2	120	160	225	290	360
	3	110	155	230	290	360
	Среднее	111.7	156.7	230.0	295.0	356.7
Через ретрансляторы	1	130	220	290	380	470
	2	135	220	285	390	480
	3	130	210	285	395	470
	Среднее	131.7	216.7	286.7	388.3	473.3

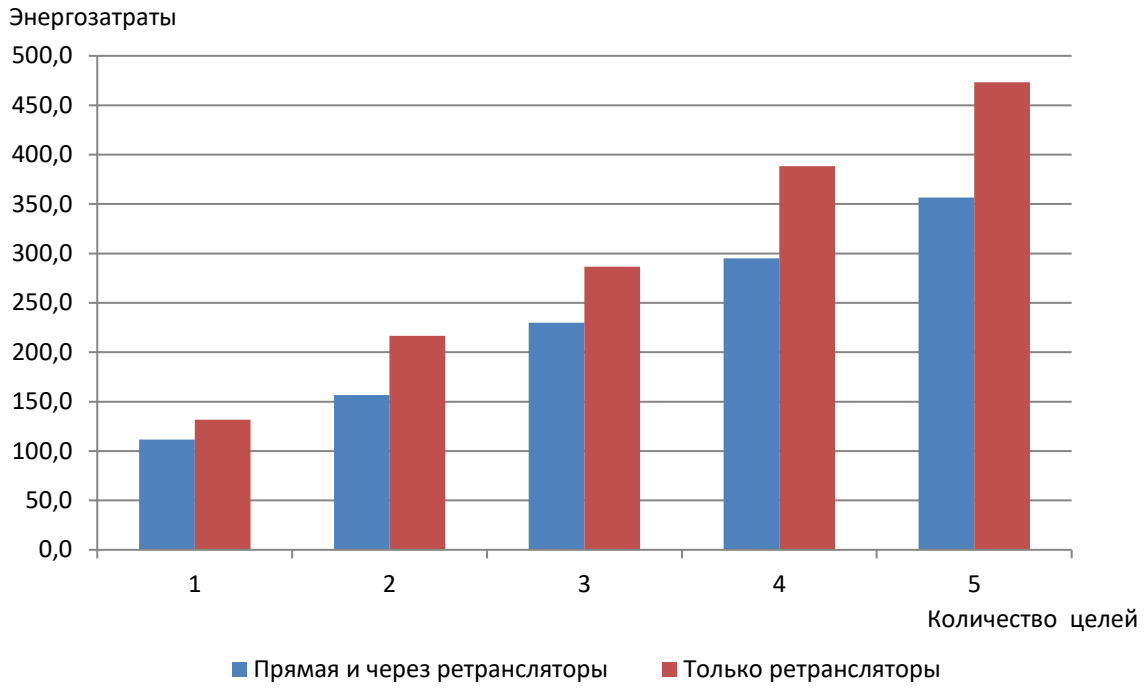


Рис. 13. Графическое представление результатов эксперимента по сравнению энергозатрат группировки КА при различных способах коммуникаций

Из приведенной выше гистограммы следует, что рост количества целей ведет к пропорциональному увеличению сообщений между КА и, как следствие, повышению энергозатрат на их передачу. При этом комбинирование способов передачи позволяет сократить энергозатраты в среднем на 28 %.

Заключение

В предлагаемом подходе задача управления поведением подвижных объектов решается не путем централизованного управления, а путем создания самоорганизующейся команды взаимодействующих, ведущих переговоры интеллектуальных агентов, способных как индивидуально планировать свое поведение в реальном времени, так и работать в группе, обеспечивая согласованность принимаемых решений.

Приведенные выше результаты исследований подтвердили эффективность методов согласованного планирования и управления групповыми операциями, выполняемыми кластером МКА за счет переговоров между спутниками без привлечения наземных служб.

Литература

1. Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу // Роскосмос. Режим доступа: http://www.federalspace.ru/main.php?id=402.
2. ***Bonabeau E., Theraulaz G.*** Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. — 2000. — Vol. 282. — N3. — Pp. 54–61.
3. ***Schilling K.*** Networked Distributed Pico-Satellite Systems for Earth Observation and Telecommunication Applications // Airspace Guidance, Navigation and Flight Control Systems Workshop (IFAC 2009), June 30–July 02, 2009. — Samara, Russia.
4. ***De Florio S.*** Performances Optimization of Remote Sensing Satellite Constellations: a Heuristic Method // Proc. of 5th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWPSS 2006), October 22–25, 2006. — Space Telescope Science Institute Baltimore, USA.
5. ***Скобелев П.О.*** Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, Автоматизация. Управление. — 2012. № 12 (117). — С. 33–46.
6. ***Скобелев П.О., Соллогуб А.В., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царёв А.В.*** Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского государственного технического университета. 2010. № 7(28). — С. 47–54.
7. ***Скобелев П.О., Соллогуб А.В., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царёв А.В.*** Мультиагентные системы для исследования методов взаимодействия космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010). Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи. — Самара: Изд–во Самарского аэрокосмического университета. 2010. — С. 226–230.
8. ***Скобелев П.О., Соллогуб А.В., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царёв А.В.*** Мультиагентные технологии в задачах дистанционного зондирования Земли // Труды XIII международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах. — Самара: Сам. НЦ РАН, ИПУСС РАН. 2011. — С. 426–434.

9. ***Соллогуб А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е.*** Применение мультиагентной системы коллективного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Труды международной научно-практической конференции «Управление большими системами-2011» (УБС'2011). Т.3. — М: ИПУ РАН. 2011. — С. 259–262.
10. ***Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царев А.В.*** Модели для решения сетецентрических задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2012. №1(56). — С. 33-38.
11. ***Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царев А.В.*** Проблемы автономного согласованного межспутникового взаимодействия в гетерогенных мультиагентных системах МКА ДЗЗ // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2012. №4. — С. 65-70.
12. Создание многофункциональной космической системы ретрансляции ЛУЧ с тремя космическими аппаратами на геостационарной орбите // Роскосмос. Режим доступа: http://www.federalspace.ru/main.php?id=15&did=602.
13. ***Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И.*** Локационные методы исследования объектов и сред // М.: ИЦ Академия. 2011. — 384с.

Published: 293. 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.