

УДК 004.94

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСПУТНИКОВЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Карсаев О.В., Соколов Б.В. (Санкт-Петербург)

Введение

Создание многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) в настоящее время является одним из наиболее активных направлений исследований и разработок в области космической индустрии. Полагается, что такие группировки в перспективе могут обеспечивать реализацию принципиально новых возможностей в области создания и развития систем связи и реализацию постоянно возрастающих потребностей в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В РФ такие исследования проводятся в рамках космической программы многоспутниковых систем «Сфера» начиная с 2018 года [1, 2].

В настоящее время многоспутниковые системы уже эксплуатируются в реальной практике. Если говорить о достижениях зарубежных коллег, то наибольший прогресс в этом направлении достигнут в области создания многоспутниковых группировок спутников связи. Примерами таких систем являются низкоорбитальные группировки спутников связи Iridium [3] и Starlink [4]. Примером функционирующей системы в области ДЗЗ может служить группировка спутников глобального наблюдения земной поверхности компании Planet [5].

В связи с созданием многоспутниковых орбитальных группировок естественным образом возникает потребность в разработке систем управления такими группировками.

Разработки в этой области в настоящее время находятся в начальной стадии исследований [6, 7]. Функциональные возможности систем управления многоспутниковыми группировками, главным образом, предопределяются их целевым назначением. В рамках данной статьи объектом исследований являются системы управления многоспутниковыми ОГ ДЗЗ.

Ключевым фактором, предопределяющим возможность реализации принципиально новых подходов к разработке систем управления многоспутниковыми ОГ, является межспутниковая связь. Наличие или отсутствие такой связи соответственно предопределяет возможность или невозможность реализации информационного взаимодействия между космическими аппаратами (КА) и, как следствие, – оперативность связи КА с наземными пунктами управления и приема информации. В связи с этим следует отметить, что межспутниковая связь уже используется в реальной практике, в частности, в ранее упомянутой системе Iridium [3].

При отсутствии межспутниковой связи разработка системы управления многоспутниковыми ОГ априори рассматривается как развитие традиционной централизованной наземной системы управления одиночными КА. В этом случае КА ОГ рассматриваются как отдельные объекты управления. План целевого применения каждого КА формируется на Земле. Во время сеансов связи с наземными пунктами (НП) ему передаются рассчитанные планы полета на определенные горизонты времени, а в обратном направлении – полученные данные наблюдений и телеметрическая информация. Как следствие, управление КА носит дискретный характер. Оперативность управления непосредственно зависит от интервалов времени между сеансами связи, которые могут быть весьма продолжительными. Именно такой подход к

построению системы управления реализован в КС компании Planet [5]. Однако, очевидные недостатки такого подхода в этой системе в значительной степени компенсируются наличием глобальной наземной инфраструктуры, которая состоит из 12 станций, расположенных в США, Великобритании, Новой Зеландии, Германии и Австралии. Ограничения возможностей дальнейшего развития такого подхода в общем случае рассматриваются в работе [8].

Наличие межспутниковой связи создает необходимую основу для реализации связи с КА в режиме реального времени, или близкого к нему. На основании этого можно рассматривать инновационный подход к построению системы управления, который базируется на принципах децентрализации управления и самоорганизации. Разработки систем управления на основе такого подхода в настоящее время относятся к области активных теоретических исследований, и в реальной практике пока еще не реализованы. В качестве основы такого подхода может рассматриваться разработанный макет специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО). Краткое описание функциональных возможностей макета и построения системы управления на его основе приведено в первой части статьи.

Имитационное моделирование представляется наиболее конструктивным и достаточно полноценным способом верификации и демонстрации функциональных возможностей систем управления. Космические системы (КС) являются достаточно сложными организационно-техническими системами, и для моделирования КС разрабатываются специализированные среды имитационного моделирования. Обзор таких сред можно найти в работе [9]. Однако предварительный анализ возможностей использования этих систем показал целесообразность разработки собственной среды моделирования в составе программного комплекса, который учитывает специфические особенности предлагаемого подхода к построению системы управления. Описание этого программного комплекса приведено во второй части статьи.

Макет СМАО

Макет СМАО является исследовательским прототипом программного обеспечения, предназначенным для построения системы автономного децентрализованного управления многоспутниковыми ОГ ДЗЗ. Основопологающим фактором реализации такой системы управления является возможность информационного взаимодействия КА. Это, в свою очередь, естественным образом предполагает необходимость реализации межспутниковых линий связи и формирование коммуникационной сети КС. В соответствии с этим полагается, что экземпляры макета СМАО должны функционировать во всех узлах сети, т.е. на всех КА и во всех наземных пунктах управления и приема информации.

В текущей версия прототипа макета СМАО реализована следующая совокупность функциональных возможностей:

- решение задач вторичной баллистики,
- распределение и перераспределение заявок ДЗЗ,
- планирование выполнения съемок по заявкам,
- конфигурация и реконфигурация бортовых устройств КА,
- решение задачи маршрутизации передачи информационных сообщений и данных в коммуникационной сети.

Целью решения задачи вторичной баллистики является выявление КА, потенциальных исполнителей заявки ДЗЗ. Таковыми являются КА, имеющие окна времени видимости целевого района наблюдения на заданном ограниченном горизонте времени.

Эта задача решается в узлах сети по мере появления новых заявок и/или возникновения заявок, требующих их перераспределения. Узлы сети, в которых появляются такие заявки, инициируют протоколы информационного взаимодействия с КА, потенциальными исполнителями заявок. При этом полагается, что заявки могут появляться квазиодновременно в разных узлах сети, а их потенциальные исполнители соответственно могут одновременно являться участниками нескольких протоколов их распределения.

В процессе выполнения протокола распределения каждый потенциальный исполнитель заявки оценивает возможность добавления съемки цели по этой заявке в текущий план ранее запланированных съемок. Если добавление съемки в текущий план является возможным, потенциальные исполнители посылают инициатору протокола распределения свои предложения по выполнению съемки. Эти предложения включают совокупность параметров, сравнительный анализ которых позволяет инициатору протокола выполнить назначение заявки КА с наилучшим предложением.

Заявки наблюдения целевых районов могут иметь различные приоритеты важности и требования по оперативности получения данных. В связи с этим предложения выполнения заявок могут иметь условный характер: назначение заявки является возможным при условии перераспределения ранее назначенной заявки с меньшим приоритетом важности и/или с меньшим требованием оперативности их выполнения. Если назначение заявки выполняется на основе такого предложения, тогда из текущего плана выбранного исполнителя удаляется соответствующая съемка и инициируется новый протокол для повторного распределения заявки.

Конфигурация бортовых устройств и систем КА в случае многоспутниковой ОГ может являться как локальной, так и системной задачей. Системная конфигурация обеспечивает квазиравномерное использование ресурсов КА ОГ и непосредственным образом учитывается при распределении заявок. Задача реконфигурации бортовых систем и устройств КА решается при выявлении нештатной ситуации. При этом также проверяется возможность КА в части выполнения текущего плана, и необходимость переназначения запланированных съемок другим КА.

Коммуникационная сеть КС является основой для передачи информационных сообщений и данных наблюдений. Под информационными подразумеваются сообщения, которыми узлы сети обмениваются при выполнении протоколов распределения и перераспределения заявок ДЗЗ. Объемы данных информационных сообщений являются относительно малыми по сравнению с объемами данных результатов наблюдений, и, как следствие, это влечет две различные постановки задачи маршрутизации с существенно различным уровнем сложности.

Коммуникационная сеть КС обладает динамически изменяемой структурой топологии. В связи с этим маршруты, устанавливаемые для передачи информационных сообщений и данных наблюдений, имеют ограниченное время существования. Однако время передачи информационных сообщений является ничтожно малым по сравнению с временем существования маршрутов. Поэтому динамика изменений топологии сети во времени не оказывает существенного влияния на передачу информационных сообщений. Кроме того, информационные сообщения являются составными актами процессов управления ОГ, и поэтому их передача имеет более высокий приоритет по сравнению с передачей данных наблюдений. В связи с этим задача маршрутизации в этом случае может рассматриваться без учета динамики изменения топологии сети.

В отличие от этого время передачи данных наблюдений может превышать время существования маршрутов. Поэтому учет динамики изменения топологии сети в этом случае является объективной необходимостью. Динамика изменения топологии может описываться в виде плана контактов, в котором указываются моменты времени

появления и окончания линий связи между узлами сети. Такой подход к маршрутизации передачи данных рассматривается в основе CGR (Contact Graph Routing) алгоритма [10], который активно развивается уже более десяти лет. В этом подходе полагается, что план контактов имеется во всех узлах сети, и на основании этого описание текущей топологии сети обновляется в узлах сети автономным образом. Такой же подход реализован и в макете СМАО.

Кроме этого, в узлах сети также поддерживаются и обновляются оперативные данные о маршрутах передачи данных, установленных другими узлами сети. Данные об установлении маршрутов и их разрушении в случае окончания передачи данных формируются обычным образом на основе широковещательной рассылки соответствующих служебных сообщений. При этом события разрушения маршрутов, вызванные изменениями топологии сети, уже не требуют широковещательных рассылок и определяются узлами сети автономно.

Таким образом, актуальные данные о текущей топологии сети и о текущем трафике являются для узлов сети необходимыми и достаточными данными для нахождения маршрутов передачи данных. Однако поиск маршрутов в узлах сети может происходить квазисовременно. В этом случае могут возникать конфликтные ситуации в части использования сетевых ресурсов. Такая ситуация, как правило, может возникать при изменениях топологии сети. Для разрешения таких конфликтных ситуаций узлы сети инициируют процессы верификации найденных маршрутов. Процесс верификации состоит в следующем. По пути маршрута посылается служебное сообщение для проверки и бронирования доступной пропускной способности каналов связи. Если это сообщение доходит до конечного узла маршрута, инициируется широковещательная рассылка сообщения о его установлении. Если какой-то канал связи оказывается уже забронированным, сообщение об этом передается по маршруту в обратном направлении. В этом случае в исходном узле выполняется поиск другого маршрута с учетом данной информации.

Получение служебного сообщения об успешной верификации найденного маршрута является событием установления маршрута, и по установленному маршруту начинается передача пакетов данных. При этом на основе плана контактов определяется время существования маршрута и рассчитывается момент времени, до которого может происходить передача пакетов данных.

Структура программного комплекса

Для верификации и демонстрации функциональных возможностей построения системы управления многоспутниковой ОГ на основе использования описанного прототипа макета СМАО был разработан программный комплекс, структура которого приведена на рисунке 1. Программный комплекс включает среду имитационного моделирования и две вспомогательные программы, которые обеспечивают расчет окон времени радиовидимости и расчет плана контактов КА-КА и КА-НП.

Окна времени радиовидимости рассчитываются на основе моделирования баллистической структуры построения ОГ во времени и являются исходными данными для расчета плана контактов. При этом расчет плана контактов, по сути, сводится к анализу ограничений в части установления линий связей и соответствующей редукции окон времени радиовидимости. Например, НП в текущий момент времени может иметь линию связи только с одним КА. Но при этом он может иметь несколько окон времени радиовидимости с несколькими КА. Тогда из их числа выбирается какой-то один КА и определяется время начала и окончания контакта (линии связи) с этим КА. По аналогии с этим определяются линии связи КА-КА и время их существования на основе

редукции окон времени радиовидимости КА-КА с учетом количества антенных комплексов, имеющихся на этих КА.

Среда имитационного моделирования обеспечивает возможность создания и выполнения различных экспериментов для верификации и демонстрации функциональных возможностей системы управления. Создание экспериментов подразумевает описание потока возникающих заявок ДЗЗ, описание возникновения нештатных событий для демонстрации работы модуля реконфигурации бортовых систем и устройств КА, а также редактирование значений системных переменных (пропускные способности линий связи КА-КА/НП, объемы данных наблюдений, технические возможности КА в части выполнения программных разворотов, тип эксперимента и др.).

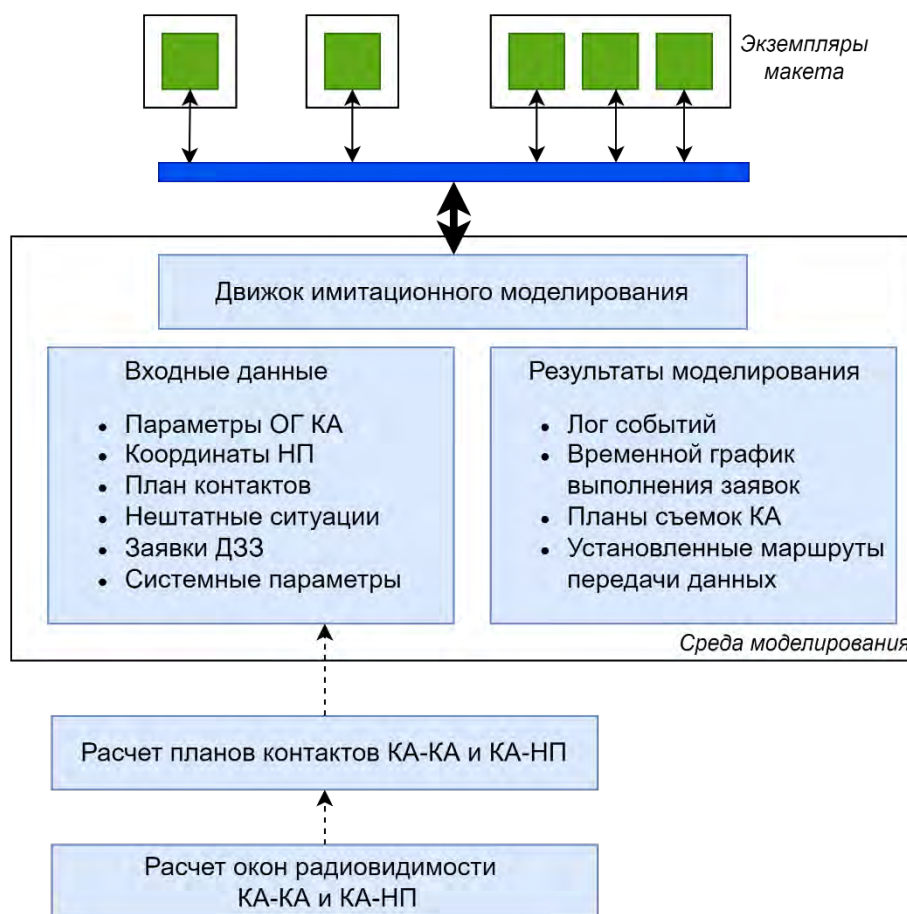


Рис.1. Структура программного комплекса

В состав программного комплекса входит виртуальная информационная шина Rabbit MQ, которая обеспечивает создание экземпляров макета СМАО и передачу сообщений между экземплярами макета и движком имитационного моделирования. При этом экземпляры макета могут создаваться и функционировать на разных вычислительных устройствах. В процессе экспериментальных исследований в качестве таких вычислительных устройств использовались прототипы бортовых компьютеров, предполагаемых к установке на КА. Это обстоятельство позволило получить оценки времени решения наиболее времяземких задач (макета) и оценить производительность прототипов бортовых компьютеров.

Схема процесса моделирования

Содержание и порядок сценария имитационного моделирования предопределяется списком событий, упорядоченных по времени возникновения, и типом проводимого эксперимента. Исходное множество событий формируется движком модели при запуске эксперимента на основе задаваемых входных данных эксперимента. В рассматриваемой модели таковыми событиями в зависимости от типа эксперимента могут быть:

- возникновение заявок ДЗЗ или появление данных на КА после выполнения съемок по заявкам,
- установление линий связи и окончание существования установленных линий связи в соответствии с планом контактов,
- выхода из строя того или иного устройства в составе определенного КА.

В процессе имитационного моделирования могут появляться новые события, которые создаются экземплярами макета и передаются движку моделирования. Таковыми событиями являются:

- появление в узлах сети входных информационных сообщений указанного типа:
 - запрос оценки выполнения заявки,
 - предложение выполнения заявки,
 - назначение заявки,
 - подтверждение включения в план съемки по назначенной заявке,
 - переназначения заявки,
 - окончание протокола распределения заявки,
- начало выполнения программного разворота КА для выполнения запланированной съемки,
- окончание выполнения съемки,
- окончание передачи одним узлом сети и появление на входе другого узла сети служебного сообщения указанного типа:
 - верификация маршрута передачи данных,
 - неуспешная верификация маршрута передачи данных,
 - установление маршрута передачи данных,
 - разрушение маршрута в связи с окончанием передачи всех данных съемки по заявке,
- окончание передачи пакетов данных по заявке в связи с окончанием времени существования установленного маршрута.

В зависимости от типа моделируемых систем и процессов шаг дискретизации модельного времени может быть либо постоянным, либо переменным. В связи с этим следует заметить, что в рассматриваемом программном комплексе реализованы три имитационные модели, как с постоянным, так и с переменным шагом. Основной составной частью программного комплекса является модель, выполняемая с помощью движка моделирования (рис. 1). Основным аспектом этой модели является информационное взаимодействие. В этом случае моделирование выполняется с переменным шагом модельного времени. Это предопределяется тем, что интервалы времени между событиями передачи информационных и служебных сообщений между узлами сети измеряются микросекундами. В этой модели, конечно же, можно рассматривать и постоянный шаг модельного времени. Например, одна микросекунда. Но в этом случае моделирование функционирования КС ДЗЗ на каком-то значимом горизонте времени, например, на интервале времени выполнения одного витка, будет выполняться слишком долго. При этом на подавляющей части шагов моделирования не будет происходить каких-либо изменений состояния моделируемой системы.

Основным аспектом двух других моделей является моделирование структуры построения ОГ КА во времени. В этих моделях применяется постоянный шаг модельного времени. В частности, в экспериментальных исследованиях рассматривался шаг модельного времени в пять секунд, который обеспечивал получение целевых результатов с требуемой точностью.

Одна из этих моделей используется для расчета окон времени радиовидимости КА-КА и КА-НП на этапе подготовки исходных данных. Другая модель используется для решения задачи вторичной баллистики с целью выявления КА, имеющих окна времени видимости целевых районов наблюдения. В отношении этой задачи следует заметить, что в рассматриваемой системе управления предполагается возможность обработки данных наблюдений и появления новых заявок на борту КА. В этом случае задача вторичной баллистики также может решаться на бортовом вычислительном устройстве КА, имеющем определенную ограниченную производительность. Таким образом, время выполнения этой модели может являться критическим фактором в части оперативности автономно принимаемых решений. Исследование этого фактора являлось одной из задач экспериментальных исследований. В связи с этим можно привести полученные метрики. Компоненты макета обеспечивают выполнение этой модели на прототипе бортового вычислительного устройства КА в течение 10 – 20 секунд при шаге моделирования в пять секунд, что является более чем приемлемым результатом.

Представление результатов моделирования

В ходе выполнения экспериментов формируются логи сообщений и событий. В логе сообщений регистрируется все сообщения, которые передаются между экземплярами макета и движком модели. Сообщения передаются в виде JSON файлов, и в этом же виде регистрируется в логе сообщений. Таким образом, в этом логе сообщений формируется информация, необходимая для отладки и верификации как макета, так и движка модели.

В логе событий в структурированном виде регистрируются определенные типы событий, которые также могут использоваться для отладки и верификации макета. Но их основным предназначением является демонстрация функционирования КС. Пример фрагмента лога событий приведен на рисунке 2.

Время	Заявка	Узел	Код	Событие	Параметры
12:00:05	2	9	2	Появление заявки	null
12:00:06	2	59	5	Запрос на выполнение заявки	null
12:00:06	2	62	5	Запрос на выполнение заявки	null
12:00:06	2	61	5	Запрос на выполнение заявки	null
12:00:06	2	9	6	Предложение выполнения заявки	null
12:00:06	2	9	6	Предложение выполнения заявки	null
12:00:06	2	9	6	Предложение выполнения заявки	null
12:00:06	2	59	8	Назначение заявки	null

Рис. 2. Пример фрагмента лога событий

Регистрация событий в структурированном виде позволяет рассчитывать и формировать различные статистические показатели целевого применения ОГ КА по выполнению заявок ДЗЗ как в табличных, так и в графических формах. На рисунке 3

приведен пример представления временных графиков выполнения заявок в графическом виде, полученных в результате моделирования функционирования КС на 20-минутном интервале времени. В графиках отображаются интервалы времени, в течение которых происходили следующие процессы:

- распределение заявок (серый цвет),
- выполнение программных разворотов КА и съемок целей (красный цвет),
- доставки данных съемок в НП (синий цвет).

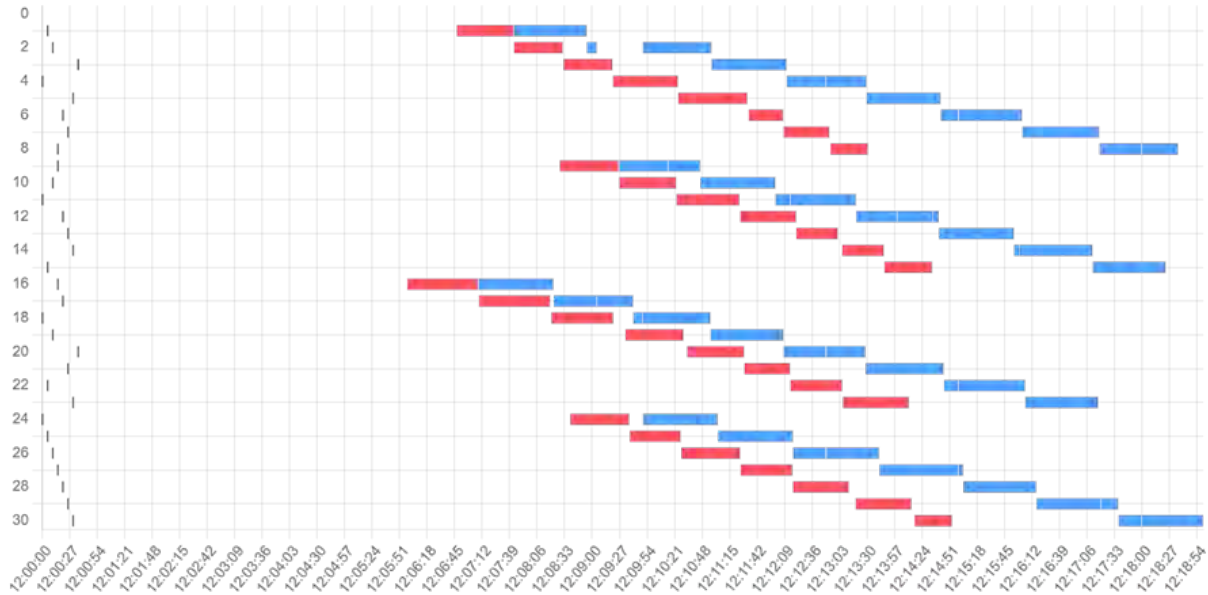


Рис. 3. Пример временных графиков выполнения заявок

Логи сообщений и событий сохраняются в БД среды моделирования после выполнения экспериментов. Наряду с этим реализована возможность приостановки выполнения экспериментов и получения оперативных данных, описывающих текущее состояние КА. На рисунке 4 приведен пример представления плана выполнения КА съемок целевых районов наблюдения. При этом в плане отображаются как уже выполненные, так и запланированные съемки. В связи с этим следует заметить, что при назначении новых заявок временные параметры выполнения запланированных съемок могут изменяться.

Заявка	Цель	Начало видимости	Окончание видимости	Простой	Разворот	Начало съемки	Окончание съемки	Крен	Тангаж
1	Astrahan	12:07:20	12:09:05	0	46	12:07:33	12:07:43	16,31	33,77
2	Volgograd	12:08:20	12:09:20	0	38	12:08:21	12:08:31	40,48	26,79
3	Saratov	12:08:40	12:10:20	1	38	12:09:10	12:09:20	16,41	19,31
4	Samara	12:09:05	12:10:40	0	54	12:10:14	12:10:24	-27,57	-21,87
5	Ivanovo	12:10:35	12:11:50	0	58	12:11:22	12:11:32	35,67	-11,28
6	Vologda	12:11:05	12:12:25	1	24	12:11:58	12:12:08	33,90	-14,99
7	Pleseeck	12:11:35	12:13:15	0	35	12:12:43	12:12:53	15,41	-18,53
8	Arhangelsk	12:12:00	12:13:50	1	27	12:13:21	12:13:31	5,43	-26,25

Рис. 4. Пример плана выполнения съемок

На рисунке 5 приведен пример отображения маршрутов передачи данных, установленных на текущий момент времени. В отношении этой графической формы требуется привести следующие пояснения. В данном случае моделировалась КС, в составе которой рассматривалось две ОГ обзорного (40 КА) и детального (36 КА)

наблюдения и 10 НП. КА обзорного наблюдения формируют опорный фрагмент сети с неизменяемой во времени топологией. У каждого КА детального наблюдения в любой момент времени имеется связь с каким-то КА обзорного наблюдения. НП в текущий момент времени могут иметь связь с одним КА обзорного или детального наблюдения.

В соответствии с этим в левой части рисунка приводится описание установленных маршрутов в виде последовательности узлов сети. Значения идентификаторов узлов сети от 1 до 10 соответствуют НП, от 11 до 50 – КА обзорного наблюдения, от 51 до 86 – КА детального наблюдения. В средней части рисунка приводится наглядное представление частей маршрутов, установленных в опорном фрагменте сети. В правой части рисунка отображаются установленные в текущий момент времени линии связи между НП и КА, и количество установленных маршрутов, в которых используются эти линии связи.

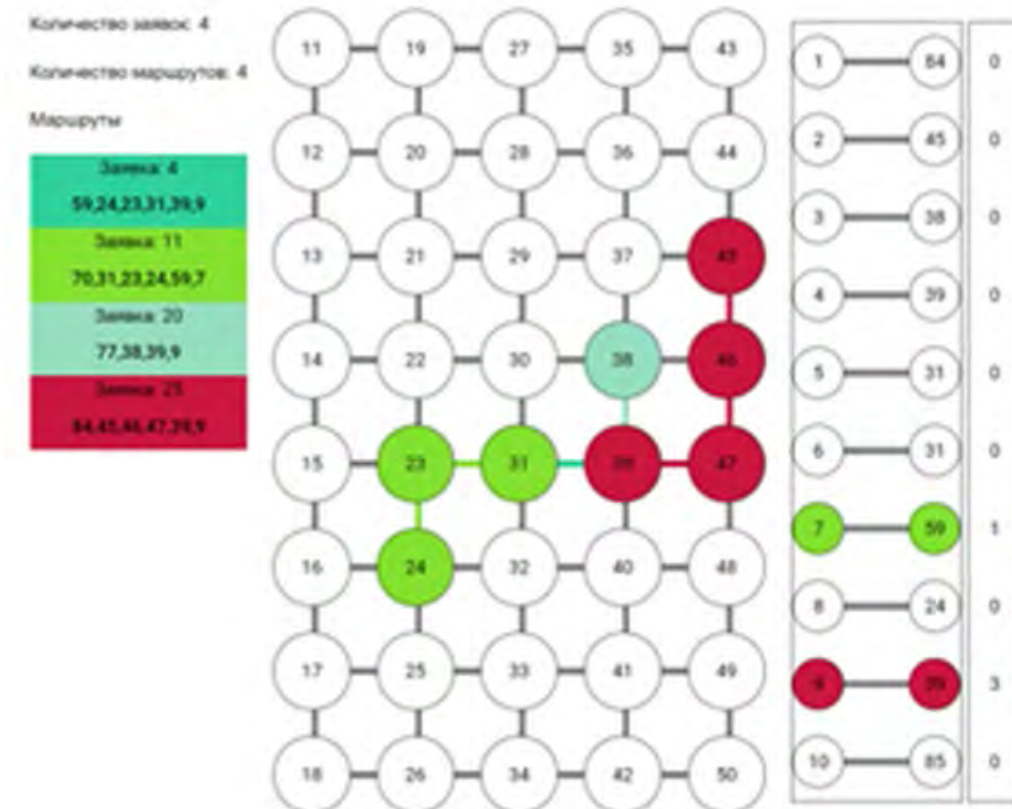


Рис. 5. Пример отображения установленных маршрутов для передачи данных

Заключение

В статье приведено описание программного комплекса, предназначенного для верификации и демонстрации функциональных возможностей инновационной системы управления многоспутниковой ОГ КА ДЗЗ, и макета программного обеспечения для построения такой системы. Предлагаемый подход к построению системы управления предполагает наличие межспутниковой связи и использование информационного взаимодействия между КА, и реализацию на основе этого децентрализованного автономного варианта управления ОГ.

Основной составной частью разработанного программного комплекса является имитационная модель КС ДЗЗ. Эта модель обеспечивает возможность получения основных оценок эффективности целевого применения ОГ КА при реализации предлагаемого подхода к построению системы управления. Таковыми оценками являются оперативность распределения и перераспределения заявок ДЗЗ,

оперативность автономного формирования допустимых планов съемок по этим заявкам, производительность ОГ и КА в части выполнения съемок, пропускная способность коммуникационной сети, оперативность доставки данных наблюдений в НП. При этом технология построения программного комплекса обеспечивает возможность получения таких оценок при условии функционирования экземпляров макета программного обеспечения на прототипах реальных вычислительных устройств, предполагаемых к установке на борту КА.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Литература

1. Космическая программа многоспутниковых систем «Сфера». https://www.tadviser.ru/Продукт:Сфера_Космическая_программа_многоспутниковых_систем
2. **Афанасьев И.** «Сфера» общих интересов. Космические информационные технологии как драйвер развития страны // Русский космос. – 2020. – № 10. – С. 8–19. <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2020-08-single.pdf>
3. **Макаренко С.И.** Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 4. – С. 1-34. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf>
4. **Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А.** Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 190-255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255
5. **Safyan M.** Planet's Dove Satellite Constellation // Pelton J.N., Madry S. (eds) Handbook of Small Satellites. Springer, Cham., 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36308-6_64.
6. **Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А.** Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7, вып. 3. – С. 61-70.
7. **Ткаченко И.С.** Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов // Онтология проектирования. – 2021. – Т. 11, № 4 (42). – С. 478-499. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
8. **Capraert J., Nag S.** (2020). Network Control Systems for Large-Scale Constellations // Pelton J.N., Madry S. (eds) Handbook of Small Satellites. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36308-6_16.
9. **Балухто А.Н., Твердохлебова Е.М.** Аналитический обзор текущего состояния и перспектив развития в области технологий и программных средств имитационного моделирования космических систем // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – 2 (107). – С. 118-133.
10. **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.