

УДК 629.786.2:519:242.5

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПРИ НАВЕДЕНИИ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ НА ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

М.Ю. Беляев

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»
Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4А
E-mail: Mikhail.Belyaev@rsce.ru.

П.А. Боровихин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»
Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4А
E-mail: pavel.borovikhin@rsce.ru.

Д.Ю. Карavaев

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»
Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4А
E-mail: dmitry.karavaev@rsce.ru.

И.В. Рассказов

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»
Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4А
E-mail: igor.rasskazov1@rsce.ru

Ключевые слова: международная космическая станция МКС, научная аппаратура, подвижные платформы наведения, телеуправление, оптимизация.

Аннотация: Описана разработанная и реализованная на МКС технология наведения научной аппаратуры орбитальной станции на исследуемые объекты. Разработанная технология предусматривает установку на станции подвижных платформ наведения и использование предложенных методов оптимизации программ наблюдения исследуемых объектов. Расширение возможностей наведения научной аппаратуры на наблюдаемые объекты исследователем, находящимся на Земле, может быть обеспечено с помощью телеуправления.

1. Введение

Выполнение многих экспериментов на космических аппаратах (КА) требует наведения используемой научной аппаратуры (НА) на исследуемые объекты [1]. Обычно НА устанавливается жестко на корпусе КА и наведение чувствительной оси НА на исследуемые объекты, расположенные на Земле или небесной сфере, осуществляется путем разворотов КА [1]. Подобная схема использовалась и на всех отечественных орбитальных станциях, хотя ее применение на станциях, имеющих сложную конфигурацию, потребовало разработки специальной технологии и создания целого комплекса математических программ [1, 2].

Размеры и масса Международной космической станции (МКС) значительно превосходят аналогичные параметры предыдущих орбитальных станций. Наведение на исследуемые объекты НА МКС и подобных крупногабаритных орбитальных станций, должно осуществляться с помощью специальных подвижных платформ наведения (ППН). С этой целью в рамках космического эксперимента (КЭ) «Ураган» разработаны и доставлены на борт станции несколько модификаций системы ориентации видеоспектральной аппаратуры («СОВА»), предназначенной для установки на иллюминаторы внутри обитаемого пространства российского сегмента (РС) МКС [3]. Она представляет собой платформу, которая позволяет наводить установленную на ней НА по командам от бортового ноутбука. В результате наведение НА на исследуемые объекты может производиться в любое время суток без участия экипажа.

Таким образом, возможности проведения экспериментов на станции значительно расширяются, особенно с учетом того, что на МКС используется несколько ППН. Это приводит к усложнению задачи оптимального планирования наблюдений.

2. Оптимизация наведения научной аппаратуры на наблюдаемые объекты

При планировании съемок аппаратурой, установленной на платформе «СОВА-1», применяется подход, который использовался для различных КЭ еще на станциях типа «Салют» и затем на станции «Мир» и МКС [1, 4, 5]. При этом в алгоритмах управления ППН «СОВА» используется модернизированная целевая функция информативности I , значение которой должно быть максимизировано при выборе набора объектов для наблюдений [6,7]:

$$(1) \quad I = \sum_i P_i \varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_{L-1} \varphi_L.$$

Сомножитель P_i в выражении (1) под знаком суммирования – оценка приоритета съемок объекта с порядковым номером i . Остальные L сомножителей – набор функций, позволяющих учесть вклад наблюдений объекта с номером i в общую информативность съемок с учетом тех специальных критериев, которые выбраны для данного эксперимента. Так, при дневных фотосъемках земной поверхности, как правило, используются три функции: величина, обратно пропорциональная степени ожидаемой над объектом облачности; оценка освещенности объекта, принимающая максимальное значение при заданной высоте Солнца над местным горизонтом объекта; оценка ожидаемого пространственного разрешения фотографии объекта.

Выбор оптимальной последовательности наблюдений заданных объектов сводится к решению различных вариантов задач маршрутизации транспорта. В частности, при использовании лишь одного комплекта НА, прежде всего для оптимизации наблюдений астрономических объектов, предложена аналогия с задачей коммивояжера [1], которая заключается в нахождении гамильтонова цикла с минимальной суммой стоимостей проходимых ребер графа. Одновременное использование нескольких комплектов НА, которые установлены на разных ППН, приводит к постановке задачи нескольких коммивояжеров, если необходимо произвести съемку всех заданных объектов, причем каждый объект должен быть снят только одним из комплектов НА, а сумма всех разворотов ППН должна быть минимальной. Один из общих подходов к решению такой задачи состоит в том, чтобы свести ее к задаче одного коммивояжера.

Задачи наблюдения земной поверхности с борта орбитальной станции, как правило, не могут быть сведены к классической задаче коммивояжера. Наземные объекты могут наблюдаться лишь в ограниченные промежутки времени, продолжительность которых зависит от взаимного положения объекта и орбиты

станции, а также от предельных углов отклонения осей чувствительности НА. Эти условия соответствуют задаче маршрутизации транспорта с временными окнами.

Поскольку платформы «СОВА» обеспечивают наведение НА через иллюминаторы, обращенные в надыр, с учетом геометрических ограничений углы отклонения и временные окна возможных наблюдений для них значительно меньше, чем те углы и интервалы наблюдений, которые могла бы обеспечить ППН, установленная на внешней поверхности станции. По этой причине съемка наземных объектов, как правило, производится в моменты их наибольшего сближения с МКС, при этом ось чувствительности НА в основном отклоняется в направлении, перпендикулярном трассе полета МКС. При этом, если это требуется для целей КЭ, может выполняться и отслеживание объекта в пределах интервала его видимости.

Так как интервалы видимости объектов и угловые скорости разворота ППН ограничены, вполне вероятно, что в рамках одного сеанса наблюдений нельзя будет снять все заданные объекты, несмотря на то, съемка каждого объекта в отдельности возможна. В подобных случаях задача оптимизации наблюдений состоит в том, чтобы выбрать лишь часть заданных объектов таким образом, чтобы их можно было снять в одном сеансе, при этом сумма информативностей наблюдений этих объектов должна быть самой высокой из возможных. С целью экономии технических ресурсов аппаратуры может также ставиться другая задача - минимизировать время работы механизмов ППН или сумму углов ее разворотов при условии, что информативность съемок должна быть не ниже заданного значения.

Эти задачи оптимизации съемок решаются как точными, так и приближенными методами. При относительно малом числе объектов, используется метод полного перебора, но в основном в настоящее время применяются точные методы линейного программирования, доступные в составе многих специальных программных пакетов. Ставятся задачи оптимизации таких линейных целевых функций как информативность наблюдений (с использованием (1)) при ограничениях, сформулированных в виде линейных равенств и неравенств. Все заданные объекты упорядочиваются в хронологическом порядке времени их наибольшего сближения с МКС. Благодаря этому расписание наблюдений для одной ППН, на которой установлена НА, задается двоичным одномерным вектором, длина которого равна числу объектов. Если какой-то объект включен в расписание, соответствующий ему элемент вектора равен единице, если нет – нулю. В одном из вариантов программы планирования наблюдений целью является формирование с помощью методов целочисленного линейного программирования для всех используемых ППН таких двоичных векторов, при которых достигается оптимальное значение целевой функции суммарной информативности наблюдений или суммы углов разворотов ППН.

Другой вариант поиска оптимального набора расписаний наблюдений для нескольких ППН аналогичен одному из подходов к решению задач маршрутизации транспорта, при котором рассматриваются всевозможные маршруты с тем, чтобы выбрать наиболее эффективные из них [8]. Сначала специальной программой формируются все допустимые (с учетом заданных ограничений) расписания наблюдений для каждого типа используемых ППН, а затем из них с помощью методов линейного программирования для каждой используемой ППН выбирается свое расписание так, чтобы обеспечить оптимизацию целевой функции [7]. Формирование расписаний может потребовать значительных вычислительных затрат, но позволяет уже на предварительном этапе учесть многие ограничения, в том числе нелинейные, которые нельзя использовать в условиях задачи линейного программирования. Кроме того, один и тот же предварительно подготовленный набор расписаний наблюдений может использоваться в качестве исходных данных для нескольких различных задач

оптимизации (например, с разным числом ППН). Без использования такого набора каждая из этих задач решалась бы за большее время.

При проведении экспериментов на МКС изучается также эффективность применения для наблюдений аппарата динамического программирования, которое успешно используется в задачах оптимальной маршрутизации [9,10].

Такие факторы, как большое количество объектов, предназначенных для исследования, использование одновременно нескольких ППН, ограниченное время, отведенное на планирование работ, могут привести к тому, что точные методы потребуют слишком больших вычислительных ресурсов и не смогут обеспечить своевременную подготовку оптимальных планов наблюдений с борта МКС. Для таких случаев предусмотрены методы, которые не гарантируют точного решения задач оптимизации, но за сравнительно небольшое время позволяют получить приближенные результаты, близкие к оптимальным. В бортовом программном обеспечении в настоящее время разработаны алгоритмы планирования наблюдений с использованием популярных генетической и муравьиной метаэвристик [6,7], которые, наряду с методами линейного программирования, дают практически важные результаты для планирования наблюдений несколькими приборами с орбитальной станции.

В настоящее время на МКС доставлены и работают три ППН «СОВА». Разработанные методы наведения реализованы на борту МКС в виде специального программного обеспечения и позволяют выполнять наблюдения исследуемых объектов фото- и спектрометрической аппаратурой по оптимальным программам, что впервые сделано в практике научных наблюдений с космической орбиты.

3. Использование телеуправления при наведении научной аппаратуры на наблюдаемые объекты

Управление подвижными платформами может выполняться также с помощью режима телеуправления. Технология телеуправления дает возможность исследователям, находящимся в научных лабораториях на Земле, самим проводить космические эксперименты. Первый успешный опыт удаленного управления научной аппаратурой орбитальной станции с помощью спутниковых каналов связи был реализован на орбитальном комплексе (ОК) «Мир». Снаружи модуля «Квант-2» ОК «Мир» была установлена автоматическая стабилизированная платформа АСПГ-М с размещенной на ней целевой НА, включающей спектрометры и телекамеры. Платформа представляла собой точный двухстепенной механизм, осуществляющий стабилизацию, прецизионное наведение и сопровождение ориентиров по цифровым, аналоговым и релейным сигналам и командам от системы управления (СУ), получившей название СУ «Сигма».

В настоящее время характеристики НА для изучения Земли и возможности передачи информации в любую точку земного шара значительно выросли. На РС МКС предусмотрена возможность наведения научной аппаратуры ППН «СОВА» исследователем, находящимся на Земле. Для этой цели используется широкополосная система связи (ШСС), установленная на российском сегменте (РС) МКС.

Широкополосная система связи предназначена для организации обмена большими потоками информации (105 Мбит/с в направлении борт-земля и 6 Мбит/с в направлении земля-борт) РС МКС и ЦУП с использованием многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч». В одном потоке возможно объединение различных видов информации: телеметрической, телевизионной, голосовой, файловый обмен. Широкополосная система связи включает бортовую и наземную часть.

Исследователь, находящийся на Земле, получает на экране компьютера информацию о полете станции и изображение подстилающей поверхности. В случае указания выбранного для исследования объекта простым кликом компьютерной мышки, на борт подается необходимая команда и ППН с НА разворачивается на наблюдаемый объект и отслеживает его. При этом происходит съемка и спектрометрирование выбранного объекта. Измерительная информация оперативно по каналу ШСС передается на компьютер исследователя, где происходит ее обработка.

4. Заключение

Таким образом, для выполнения исследований в рамках КЭ «Ураган» были разработаны подвижные платформы наведения, которые уже доставлены на борт МКС. При наведении на изучаемые объекты исследовательской аппаратуры, устанавливаемой на ППН, впервые реализованы и используются оптимальные методы планирования наблюдений. Для выполнения наблюдений с помощью нескольких ППН реализованы методы, используемые при решении задач маршрутизации транспорта, в том числе задачи нескольких коммивояжеров. Весьма перспективным направлением является и режим телеуправления ППН.

Список литературы

1. Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984.
2. Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Манжелей А.И. и др. Математическое обеспечение автоматизированного планирования исследований на орбитальном комплексе «Мир» // Космические исследования. 1988. Т. 27, Вып. 1. С. 126-134.
3. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Боровихин П.А. и др. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2018. № 4 (23). С. 70-80.
4. Беляев М.Ю. Оперативное планирование научных экспериментов, проводимых с помощью КА // Космические исследования. 1980. Т. 18, Вып. 2. С. 235-241.
5. Беляев М.Ю., Рулев Д.Н. Оптимизация программы экспериментов при оперативном планировании исследований, выполняемых с КА // Космические исследования. 1987. № 1. С. 30-36.
6. Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю., И.В. Рассказов И.В. Оптимизация наведения научной аппаратуры крупногабаритной орбитальной станции на наблюдаемые объекты // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы. Ростов-на-Дону, 2021. Т. 3. С. 70-72.
7. Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Ветошкин А.М., Караваев Д.Ю., Рассказов И.В. Наведение научной аппаратуры международной космической станции на исследуемые объекты // Космические исследования. 2022. Т. 60, № 1. С. 80-89.
8. Toth P., Vigo D. Vehicle Routing Problems, Methods, and Applications. Second Edition. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, Mathematical Optimization Society, 2014.
9. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Оптимальная маршрутизация машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Математические модели и алгоритмы: монография. Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 247 с.
10. Ченцов А.Г., Ченцов А.А., Сесекин А.Н. Задачи маршрутизации перемещений с неаддитивным агрегированием затрат. Изд. 2-е, стереотип. М.: ЛЕНАНД, 2021. 332 с.