

М. Ю. БЕЛЯЕВ, П. А. БОРОВИХИН, А. М. ЕСАКОВ, Д. Ю. КАРАВАЕВ, И. В. РАССКАЗОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ НАВЕДЕНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ НА НАБЛЮДАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «УРАГАН» НА МКС

Космический эксперимент (КЭ) «Ураган» на Международной космической станции (МКС) направлен на отработку научной аппаратуры (НА) и методов наблюдения различных объектов и явлений на Земле. Часть НА уже функционирует на борту станции, а часть должна быть отправлена на орбиту в ближайшее время. В отличие от отечественных орбитальных станций «Салют» и «Мир» МКС не была приспособлена для наведения установленной на ней аппаратуры на исследуемые объекты вследствие малого располагаемого кинетического момента гиродинов, установленных для управления ориентацией МКС на американском сегменте. Это потребовало разработки специальных методов и устройств для наведения НА КЭ «Ураган» на изучаемые объекты, позволяющие оптимизировать программу исследований эксперимента на МКС. В статье рассмотрены эти методы.

Ключевые слова: Международная космическая станция, космический эксперимент «Ураган», научная аппаратура, наведение, оптимизация, подвижная платформа.

Введение

В соответствии с российской программой научных исследований на орбитальных станциях «Салют», «Мир» КЭ традиционно проводились во всех научных направлениях [1], при этом во многих случаях требовалось наведение НА на изучаемые объекты. На МКС в настоящее время также выполняются самые разные КЭ, однако поскольку полет МКС осуществляется в режиме орбитальной ориентации, то ее развороты в целях экспериментов практически невозможны вследствие малого располагаемого кинетического момента гиродинов американского сегмента. Этот режим полета МКС обусловлен рядом причин. Для НАСА и других участников проекта американского сегмента (АС) МКС основная научная задача станции состояла в проведении исследований в области

Беляев Михаил Юрьевич. Доктор технических наук, профессор, ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева» (г. Королев, Московская обл.); заведующий кафедрой систем автоматического управления, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Мытищи, Московская обл.). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Боровихин Павел Александрович. Кандидат технических наук, инженер-математик, ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева».

Есаков Алексей Михайлович. Аспирант, инженер, ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева».

Караваев Дмитрий Юрьевич. Кандидат технических наук, главный специалист, ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева».

Рассказов Игорь Владимирович. Аспирант, инженер, ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева».

Статья по пленарному докладу на XXX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2023.

микрогравитации и выполнении медицинских экспериментов. Для этого не требуется построения специальной ориентации МКС – подходит ее ориентация в орбитальной системе координат, при которой гравитационный возмущающий момент близок к нулю. Управление ориентацией МКС осуществляется с помощью гироскопов, установленных на АС МКС, и двигателей ориентации российского сегмента станции. Следует заметить, что применение гироскопов для управления ориентацией крупногабаритных космических аппаратов (КА) сопряжено с серьезными проблемами, связанными прежде всего с большими значениями моментов инерции этих спутников, к числу которых относятся и МКС. Располагаемый кинетический момент четырех гироскопов АС МКС составляет $19\,000\text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, что позволяет только поддерживать ориентацию станции в орбитальной системе координат при совмещении главных осей инерции МКС с осями орбитальной системы. Для выполнения разворотов МКС или построения произвольной ориентации станции в качестве исполнительных органов принципиально могут задействоваться двигатели ориентации российского сегмента МКС, однако это повлечет за собой чрезмерно большой расход топлива. В связи с этим наводить на исследуемые объекты жестко закрепленные на МКС приборы путем разворотов станции практически невозможно.

Используемый режим полета МКС потребовал создания специальных методов наведения научной аппаратуры российского сегмента на изучаемые объекты. В ходе КЭ «Ураган», направленного на изучение объектов на Земле, были разработаны различные подходы для наведения НА. Ряд приборов КЭ «Ураган»: фотоспектральная система (ФСС), видеоспектральная система (ВСС), фотоаппаратура с большим фокусным расстоянием – имеют узкое поле зрения [2]. Первоначально наводить эти приборы на изучаемые объекты мог только экипаж станции, что ограничивало возможности проведения исследований. Чтобы выполнять эту операцию в автоматическом режиме, необходимо использовать подвижные платформы наведения (ППН) [3]. Наведение на объекты изучения приборов с относительно большим полем зрения (типа создаваемого в рамках КЭ «Ураган» инфракрасного радиометра высокого разрешения (РИВР) или соответствующей фотоаппаратуры) осуществляется за счет движения МКС по орбите и прецессии самой орбиты станции. Аппаратура в этом случае жестко закреплена на корпусе станции [2].

Для части приборов КЭ «Ураган», таких как НА «Икарус», РИВР, жестко закрепленных на корпусе станции, предусмотрена работа в автоматическом режиме. Устройство «гиперспектрометр» для выполнения съемки устанавливается экипажем российского сегмента (РС) МКС на иллюминатор №9. Наведение РИВР, гиперспектрометра на исследуемые объекты не требует разворотов станции, однако при их использовании расходуются ее ресурсы: увеличивается время, необходимое экипажу для подготовительных и заключительных операций с НА для выполнения эксперимента, требуется большой объем памяти записывающего устройства НА и т.д., что необходимо учитывать при планировании наблюдений с помощью этих приборов [2, 4].

Количество объектов наблюдения велико, при этом приоритетные объекты могут наблюдаться в разнообразных сочетаниях. В связи с этим возникает необходимость параллельно использовать несколько комплектов ППН на разных иллюминаторах и большой объем действующей и создаваемой научной аппаратуры КЭ «Ураган» (ВСС, ФСС, фотоаппаратура, гиперспектрометр, РИВР и др.). Ввиду этого, а также наличия ограничений на возможность выполнения наблюдений и требуемые ресурсы появляется потребность в оптимизации планирования наблюдений.

С этой целью разработаны как точные методы, так и алгоритмы, позволяющие получить приближенные решения в тех случаях, когда точные требуют неприемлемых вычислительных затрат. Используются полные или частичные аналоги задач маршрутизации транспортных средств, в частности «задачи нескольких коммивояжеров» [5]. В качестве точного метода в основном служит выбор оптимальных сочетаний программ наблюдений, осуществляемый с помощью целочисленного линейного программирования из наборов всех возможных программ, которые предварительно формируются для каждого прибора с учетом задаваемых ограничений. Приближенные методы основаны на генетической и муравьиной метаэвристиках.

Представленные подходы реализованы в составе специального программного обеспечения (ПО) экспериментов МКС и используются для оптимального планирования и выполнения фотографической и спектрометрической съемки земной поверхности. Наведение научных приборов может производиться в автоматическом режиме одновременно несколькими поворотными платформами, которые устанавливаются на иллюминаторы внутри обитаемого пространства станции.

Использование подвижных платформ наведения исследовательской аппаратуры на изучаемые с РС МКС объекты

На начальной стадии полета МКС наведение научных приборов на изучаемые объекты осуществлялось экипажем станции [2, 6]. Привлечение космонавтов к выполнению научных наблюдений дает определенные преимущества в процессе проведения исследований. К сожалению, постоянно нести такую «научную вахту» космонавты не могут, так как большую часть суток они должны заниматься другой работой, а ночью отдыхать.

Чтобы расширить возможности при выполнении целевых программ на станции, РКК «Энергия» совместно с Институтом прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (Республика Беларусь) в рамках реализуемого на РС МКС эксперимента «Ураган» по исследованию Земли разработаны специальные ППН «СОВА» (рис. 1). Они предназначены для установки на иллюминаторах служебного модуля (СМ) РС МКС и многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) МКС различной НА и ее наведения, а также для обеспечения съемки по заданной программе с участием оператора или без него.

Система «СОВА» состоит из устанавливаемой на иллюминатор собственно платформы наведения, на которой фиксируется съемочная аппаратура, и управляющего ноутбука, расположенного в 1,5–3 м от иллюминатора. Система позволяет наводить поля зрения НА и отслеживать объект по изображению на экране ноутбука. Предусмотрено несколько модификаций аппаратуры «СОВА» для установки на РС МКС.

ППН «СОВА-228» устанавливается на иллюминатор диаметром 228 мм СМ РС МКС и позволяет поворачивать установленную на ней съемочную аппаратуру на $\pm 180^\circ$ вокруг оси визирования и наводить с углом отклонения не менее 20° в одной плоскости от оптической оси иллюминатора.

ППН «СОВА-426» устанавливается на иллюминатор диаметром 426 мм как СМ, так и МЛМ РС МКС и обеспечивает возможность наведения съемочной аппаратуры по двум взаимно перпендикулярным осям с углами отклонения не менее $\pm 30^\circ$.

В ходе проектирования были рассмотрены два варианта конструктивного построения ППН «СОВА». «СОВА-1» (рис. 1, а) выполнена по следующей схеме: съемочная НА закрепляется на ней неподвижно, а сканирование поверхности Земли осуществляется посредством зеркала, установленного на подвесе, поворачивающемся при помощи электроприводов. «СОВА-2» (рис. 1, б) построена по «классической» схеме на основе ранее разработанных систем наведения. В качестве электроприводов, обеспечивающих поворот установленной аппаратуры, использованы линейные актуаторы.

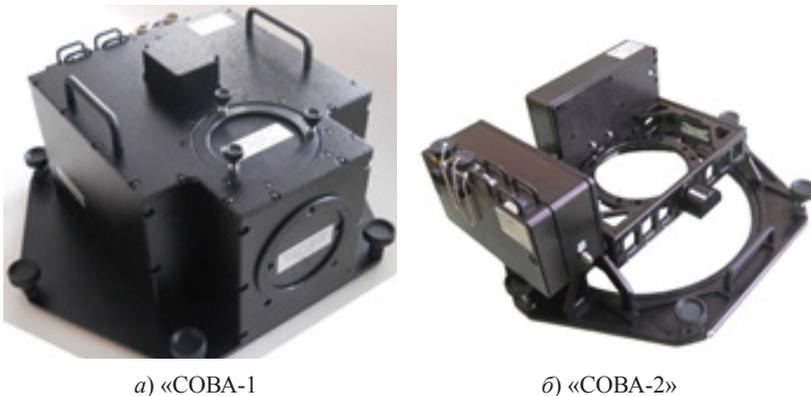


Рис. 1. Подвижные платформы наведения

Скорость углового перемещения оптической оси платформ наведения «СОВА-1» и «СОВА-2» составляет $0,75-1,5$ °/с и $0,5-6,0$ °/с соответственно.

Следует отметить, что, хотя возможности наведения подобных «внутренних» платформ на РС МКС в общем случае ограничены по сравнению с потенциальными возможностями внешних ППН, у них есть и существенные преимущества – прежде всего дешевизна и удобство обслуживания. Одна из таких ППН уже работает на борту РС МКС, и в этом году на станцию доставлены и готовятся к эксплуатации еще две платформы «СОВА». Благодаря этим системам в автоматическом режиме осуществляется наведение на исследуемые объекты ВСС и фотоаппаратуры. Характеристики и возможности ВСС приведены в [7–9]. Используемые в КЭ «Ураган» цифровые фотокамеры Nikon D3X, Nikon 800 позволяют получать с борта РС МКС цветные снимки с разрешением до 2 м (см. рис. 2–5).



Рис. 2. США. Плотина Пауэлл



Рис. 3. Россия. Крым, Керчь, Крымский мост



Рис. 4. Россия. Адлер



Рис. 5. США. Нью-Йорк

ППН позволяют значительно расширить возможности МКС по исследованию Земли и небесной сферы. Для осуществления наблюдений заданных объектов в этом

случае могут задействоваться методы оптимального планирования программы научных экспериментов. Это обеспечивает получение максимального объема полезной научной информации при соблюдении заданных ограничений на планирование.

Заметим, что задачи оптимизации ставятся в различных областях науки и техники. Например, с целью оптимального автоматического централизованного планирования поиска скоплений рыбопромысловых объектов с использованием нескольких безэкипажных катеров решается «задача нескольких коммивояжеров». При этом разработаны как точный метод (основанный на идее динамического программирования модификация алгоритма Хельда–Карпа), так и более оперативный приближенный (модификация аукционного метода) [10]. Подход на основе динамического программирования применяется для решения существенно усложненных вариантов «задачи нескольких коммивояжеров», которые ставятся, в частности, при проектировании технологических процессов раскроя листовых материалов [11, 12].

Еще более распространенным подходом к точному решению задач маршрутизации транспорта является их формулировка в виде задач целочисленного и частично-целочисленного линейного программирования [13, 14]. Например, при анализе выборки работ по оптимизации полета беспилотных летательных аппаратов, опубликованных во втором десятилетии текущего века, доля методов линейного программирования при поиске точных решений оценивается более чем в 40% [15]. Среди приближенных методов столь же значительна доля алгоритмов, основанных на генетической метаэвристике, а следующими по частоте использования оказываются муравьиные алгоритмы [15].

Эволюционные алгоритмы, в частности генетические, применяются при маршрутизации других видов автономных транспортных средств с учетом действующих ограничений [16] и для листовой резки [17]. Методы линейного программирования и генетические алгоритмы играют значительную роль и при решении задач оптимизации съемок земной поверхности автоматическими спутниками дистанционного зондирования [18, 19]. Для управления группами беспилотных летательных аппаратов предлагаются также различные эвристические методы и их сочетания [15], например многофазный итерационный алгоритм, который является комбинацией метода статистических испытаний, «жадного алгоритма» и других эвристик [20].

Операции по последовательному наблюдению нескольких объектов с помощью научного прибора, жестко закрепленного на поворотной платформе, можно подразделить на два основных типа: обсервация отдельного объекта и «перенацеливание» – переход от отслеживания одного объекта к отслеживанию другого.

Алгоритмы отслеживания отдельного объекта в эксперименте «Ураган» определяются целями исследований и ограничиваются прежде всего условиями видимости объекта с борта МКС, предельными углами и максимальной скоростью разворота оси чувствительности прибора. Примерами таких алгоритмов служат выполнение одного фотографического снимка объекта, спектрографическое исследование заданного объекта в течение всего интервала его видимости, последовательная съемка объекта относительно большого размера по частям и т.д.

Предполагается, что операции, производимые любым из возможных алгоритмов отслеживания отдельных объектов, характеризуются:

- ожидаемым временем начала и окончания отслеживания;
- направлениями оси чувствительности прибора в начале и конце отслеживания;
- суммой модулей углов разворота оси чувствительности за время отслеживания;

- информативностью – количественной оценкой ценности научной информации, получаемой при исследовании объекта [5].

Исходя из этих данных, алгоритм планирования наблюдений должен выбрать объекты и последовательность перехода между ними с учетом заданных ограничений. Одновременно решается некоторая задача оптимизации, например максимизации суммарной информативности наблюдений или минимизации суммы углов разворотов оси чувствительности научного прибора при условии, что суммарная информативность не опускается ниже заданной величины.

Объекты могут наблюдаться одновременно посредством нескольких научных приборов, установленных на разных поворотных платформах. В таком случае для каждой платформы должна быть составлена своя программа наблюдений некоторого подмножества объектов из общего списка. При этом обычно ставятся задачи оптимизации какой-либо суммарной величины – общей информативности наблюдений, выполняемых с помощью всех платформ, или суммы разворотов платформ.

Для оптимального управления одной платформой с установленной на ней НА пригоден подход с применением методов линейного программирования, впервые предложенный в [21, 22]. При оптимизации наблюдений, выполняемых с помощью нескольких управляемых платформ в КЭ «Ураган» на РС МКС, использовались дополнительные варианты формулировок в терминах целочисленного линейного программирования, основанные на аналогии с так называемой «расширенной» формулировкой задачи маршрутизации нескольких транспортных средств [5, 23, 24]. Сначала для каждой платформы формируются наборы возможных программ наблюдений объектов, из которых затем выбираются (по одной для каждой платформы) такие программы, которые в совокупности составляют оптимальное решение.

Помимо пилотируемых космических полетов, значительный опыт планирования и выполнения съемок заданных наземных объектов накоплен в области управления группировками автоматических спутников дистанционного зондирования Земли [18]. Отмечается тенденция к отказу от участия наземных служб в подготовке детальных полетных заданий. Вместо этого базовые задачи планирования съемок и передачи их результатов на Землю решаются совместно бортовым программно-математическим обеспечением спутников, входящих в группировку [19, 25].

Подобный подход, который предполагает задействование не только наземного, но и бортового программно-математического обеспечения для детального планирования экспериментов (прежде всего связанных с дистанционным зондированием Земли – ДЗЗ), применяется и для организации научных исследований на борту РС МКС в эксперименте «Ураган».

В качестве примера использования математического обеспечения, разработанного для КЭ «Ураган», рассмотрим сравнительно простую задачу съемки заданных наземных объектов фотоаппаратами с длиннофокусными объективами. На рис. 6 горизонтальной осью с уровнем 0 условно представлена траектория полета МКС. Время полета отсчитывается вдоль этой оси (в секундах) слева направо начиная с условной точки отсчета со значением 0. По вертикали, то есть перпендикулярно траектории, отсчитываются углы (в градусах), на которые оси визирования фотоаппаратов отклоняются от надира; отклонению влево от трассы соответствуют положительные значения углов, отклонению вправо – отрицательные.

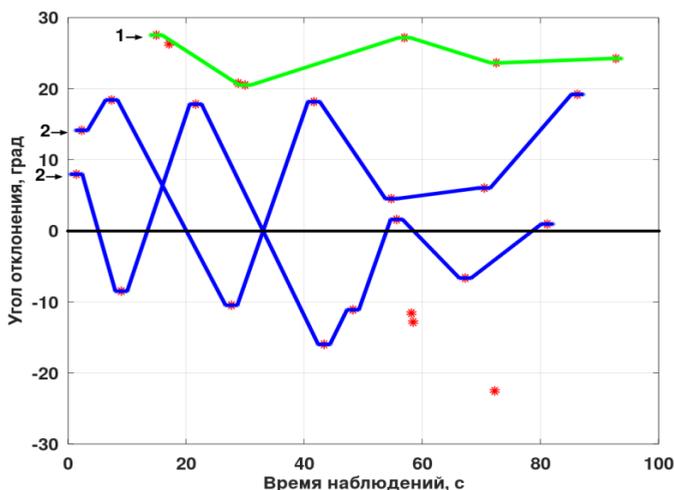


Рис. 6. Схема съемок 20 объектов из 25 заданных (используются одна платформа типа «СОВА-1» и две платформы типа «СОВА-2»)

25 объектов, рекомендованных для фотографирования, обозначены на рис. 6 кружками. Горизонтальная координата каждого кружка – это момент времени, в который расстояние между данным объектом и МКС минимально; вертикальная координата – угол, на который в этот момент должна быть отклонена от надира ось визирования фотоаппарата, чтобы успешно сфотографировать объект.

Наведение на объекты и их съемка производятся в течение примерно 100 секунд с помощью трех поворотных платформ одновременно. Одна платформа относится к типу «СОВА-1» с максимальной скоростью разворота 1,5 °/с и максимальным возможным отклонением оси визирования фотоаппаратуры от надира 30°. Две другие платформы относятся к типу «СОВА-2», они обеспечивают максимальную скорость разворота 6 °/с и максимальное отклонение от надира 20°.

От каждой платформы требуется, чтобы ось визирования фотоаппарата отклонилась на заданный угол не позднее, чем за одну секунду до момента наибольшего сближения МКС с объектом, и через одну секунду после указанного момента был возможен разворот для перехода к следующему объекту. Таким образом, на фотографирование выделяется две секунды.

С учетом указанных выше ограничений на скорость разворота платформ и на время фотографирования объектов было подготовлено 8659 возможных программ наблюдений для платформы типа «СОВА-1» и 241 919 – для платформы типа «СОВА-2».

Задача линейного программирования формулировалась следующим образом: требовалось найти двоичный вектор \mathbf{X} , доставляющий максимум функции

$$I(\mathbf{X}) = \sum_{r=1}^M n_r x_r, \tag{1}$$

где n_r – количество объектов, наблюдаемых по программе с номером r .

Вектор \mathbf{X} длиной $M = 250\,578$ элементов представляет все возможные программы наблюдений и составлен путем объединения векторов \mathbf{X}_1 (длиной 8659) и \mathbf{X}_2 (длиной 241 919), соответствующих платформам «СОВА-1» и «СОВА-2». Если программа с конкретным значением номера r (от 1 до M) выбрана для наблюдений платформой

соответствующего типа, в векторе \mathbf{X} элемент с этим номером принимает значение 1. Если же данная программа не выбрана, элемент \mathbf{X} с этим номером равен 0.

Таким образом, в качестве целевой в (1) использовалась простейшая функция информативности наблюдений, равная числу наблюдаемых объектов.

Количество задействованных платформ каждого типа задавалось следующими условиями:

$$1^T \mathbf{X}_1 \leq 1, \quad 1^T \mathbf{X}_2 \leq 2. \quad (2)$$

Запрещалась съемка одного и того же объекта с помощью более чем одной платформы любого типа, поэтому вводилось ограничение

$$\sum_{r=1}^M a_{ir} x_r \leq 1, \quad i = 1, \dots, 25. \quad (3)$$

При этом двоичный коэффициент a_{ir} формировался так, что для первых 8659 значений индекса r $a_{ir} = 1$, если объект с номером i выбран для наблюдений с помощью платформы «СОВА-1» в программе r ; для следующих 241 919 значений r $a_{ir} = 1$, если объект с номером i выбран для наблюдений с помощью одной из платформ «СОВА-2» в программе r . В остальных случаях $a_{ir} = 0$.

В результате решения этой задачи методами линейного программирования было определено максимальное количество объектов, которые можно сфотографировать при заданных условиях, – 20, а также найден один из наборов программ наблюдений, обеспечивающих съемку такого числа объектов. Это и отображено на рис. 6.

Далее была поставлена задача найти такой набор программ наблюдений, при котором съемка 20 объектов производится при минимальной сумме углов разворотов всех платформ. На сей раз минимизировалась следующая функция:

$$R(\mathbf{X}) = \sum_{r=1}^M \theta_r x_r. \quad (4)$$

Здесь θ_r – сумма углов разворотов поворотной платформы, для которой подготовлена программа с номером r .

Вместе с ограничениями (2), (3) учитывалось

$$\sum_{r=1}^M n_r x_r = 20. \quad (5)$$

Решение показано на рис. 7. Минимальная сумма углов разворотов приблизительно в 2 раза меньше суммы разворотов, представленных на рис. 6.

Таким образом, поставлена и решена двухкритериальная задача оптимизации (что во многих случаях характерно и для задач управления беспилотными летательными аппаратами [15]). В общем случае каждый из этих критериев может быть в свою очередь составлен из нескольких критериев: например, число наблюдаемых объектов можно заменить составной целевой функцией информативности, подобной тем, которые далее в данной статье сформулированы для РИВР и гиперспектрометра.

В приведенных выше примерах оказалось невыполнимым сфотографировать все заданные объекты, а набор снятых объектов может меняться в зависимости от выбранных программ наблюдений. Чтобы за заданный интервал времени отснять все объекты, в данном случае требуется использовать дополнительные платформы.

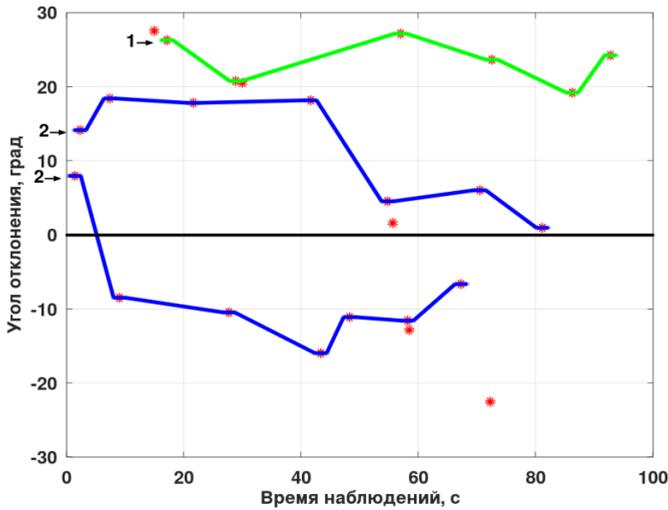


Рис. 7. Схема съемок 20 объектов из 25 заданных с минимальной суммой разворотов платформ

При увеличении количества заданных объектов и числа платформ, участвующих в наблюдениях, может оказаться, что точное решение задач оптимизации в приемлемые сроки получить нельзя. Для таких ситуаций предусмотрено применение генетических алгоритмов [26], которые работают согласно следующей общей схеме [23].

Вводится определение генотипа \mathbf{Y} как объединения (конкатенации) трех числовых строк, каждая из которых обозначает программу наблюдений для одной из трех платформ наведения. Поскольку в рассмотренном примере введена строгая хронологическая последовательность съемок объектов, каждая программа наблюдений может быть представлена двоичным вектором, чьи компоненты соответствуют объектам из общего списка, упорядоченного по времени их наблюдений. Выбранные для съемки объекты обозначаются числом 1, а не выбранные – 0.

Случайным образом формируется начальное поколение популяции (набор генотипов), после чего запускается процесс эволюции, при котором следующее поколение складывается на основе предыдущего с помощью стандартных операторов скрещивания, мутации и отбора. Алгоритм, как правило, останавливается после достижения заданного числа поколений. При отборе выделяются генотипы с наибольшими значениями следующей функции приспособленности:

$$F(\mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^3 I_i - P_1 N_1 - P_2 N_2. \tag{6}$$

Здесь I_i – оценка эффективности входящей в генотип программы наблюдений, осуществляемых посредством поворотной платформы с номером i (в данном примере – число наблюдаемых объектов в программе). Использовались две штрафные функции, которые обеспечивали количественный учет нарушений заданных ограничений. Во-первых, в каждой входящей в генотип последовательности выявлялись пары объектов, отслеживание которых в одной и той же программе невозможно в силу заданных ограничений. Общее число N_1 таких нарушений, выявленных в генотипе, подсчитывалось и умножалось на величину штрафа P_1 . Во-вторых, в последовательностях наблюдений, производимых разными платформами, выявлялись одни

и те же объекты. Такие совпадения считались запрещенными, и их число N_2 также умножалось на некоторый штраф P_2 .

По окончании работы алгоритма в качестве решения выбирался генотип с максимальным значением выражения (6), при условии что количество нарушений в обоих типах равно нулю.

Аналогичным образом минимизировалась и сумма углов разворотов платформ. При этом в дополнение к указанным выше штрафам вводился еще один за отклонение числа объектов от заданного значения.

В отличие от алгоритмов линейного программирования в отношении генетических алгоритмов невозможно гарантировать, что полученный с их помощью результат является оптимальным в строгом смысле этого слова. Так, привлечение специального бортового ПО, основанного на генетическом алгоритме с функцией приспособленности (6), к решению задач, представленных на рис. 6, позволило получить то же значение, что и при помощи методов линейного программирования. Вместе с тем при решении задачи, представленной на рис. 7, найденная сумма углов разворотов платформ превысила точное минимальное значение на 4,3%.

Тем не менее, несмотря на меньшую точность по сравнению с методами линейного программирования, генетические алгоритмы позволяют в короткие сроки получить достаточно эффективные решения, которые применимы на практике, что особенно актуально при планировании наблюдений объектов из обширных каталогов. Например, была поставлена задача для списка из 200 объектов в интервале наблюдений продолжительностью 300 с найти наибольшее число объектов, которые можно наблюдать с помощью одной платформы «СОВА-1» и двух платформ «СОВА-2». Благодаря генетическому алгоритму было найдено число 103, а также определен один из возможных наборов программ, чтобы наблюдать такое количество объектов. Затем посредством другого генетического алгоритма были сформированы программы с меньшей (в 2,5 раза) суммой углов разворотов платформ, наводящихся на 103 объекта из 200 заданных. Это решение показано на рис. 8.

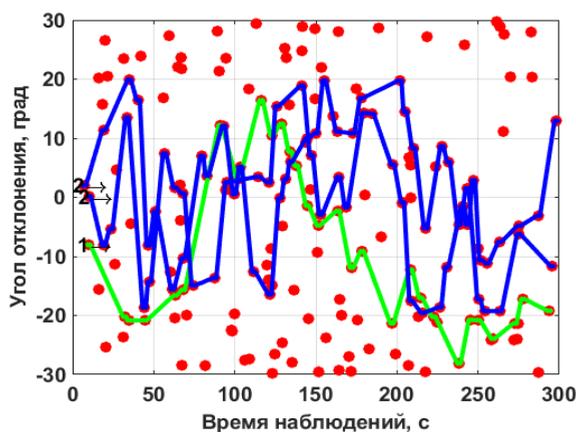


Рис. 8. Схема съемок 103 объектов из 200 заданных (используются одна платформа типа «СОВА-1» и две платформы типа «СОВА-2»)

В программном обеспечении планирования наблюдений внешних объектов с борта МКС предусмотрено также решение задач, аналогичных «задаче нескольких коммивояжеров», которые могли бы возникнуть, например, при оптимизации

съемок нескольких астрономических объектов с помощью нескольких подвижных платформ [5]. Подобные задачи могут ставиться и при наблюдении земной поверхности. Для их приближенного решения используются специальные генетические алгоритмы без привлечения штрафных функций, а также алгоритмы, основанные на муравьиной метаэвристике.

Оптимизация программы наблюдений, выполняемых с помощью РИВР

Для мониторинга Земли в среднем и дальнем ИК-диапазонах в КЭ «Ураган» применяется РИВР, созданный на предприятии «Российские космические системы». Эта аппаратура с учетом высоты орбиты МКС позволяет получать информацию мирового уровня и обладает следующими основными характеристиками [2, 4]:

- число информационных каналов – 2;
- границы спектральных диапазонов каналов по уровню 0,5 составляют:
 - ✓ 3,5–4,1 мкм;
 - ✓ 8,0–10,0 мкм;
- пространственное разрешение с высоты номинальной орбиты МКС (400 км) – 30 м;
- полоса обзора для орбиты высотой 400 км – 70 км;
- эквивалентная шуму разность измеряемых температур на уровне 300 К:
 - ✓ в диапазоне 3,5–4,1 мкм – $\leq 0,5$ К;
 - ✓ в диапазоне 8,0–10,0 мкм – $\leq 0,2$ К;
- разрядность выходной информации – не менее 10 бит;
- режим работы – сеансный.

Функционально РИВР состоит из:

- оптико-электронного блока (ОЭБ), формирующего видеoinформацию в 2 спектральных диапазонах – 3,5–4,1 и 8,0–10,0 мкм;
- блока управления радиометром, предназначенного в том числе для сопряжения ОЭБ с бортовыми системами МКС.

ОЭБ устанавливается на внешней поверхности МЛМ РС МКС, а блок управления радиометром – внутри МЛМ. В радиометре использован принцип многострочного механического сканирования, который даже при сравнительно небольшом числе чувствительных элементов приемника излучения позволяет реализовать пространственное разрешение 30 м и полосу обзора 70 км (угол обзора – 10°) при эквивалентной шуму разности измеряемых температур не менее 0,2 К на фоновом уровне температуры в 300 К.

ОЭБ радиометра содержит: плоское сканирующее зеркало, совершающее колебательные движения с периодом 1,144 с за счет низкооборотного прецизионного привода; зеркально-линзовый объектив; систему спектроделения и многоэлементные приемники излучения. В данном случае это отечественные многоэлементные (матричные) ИК-фотоприемники форматом 4×288 элементов, охлаждаемые микрокриогенной системой до криогенных температур (80 К) и имеющие наработку на отказ не менее 6000 часов. Ось колебания сканирующего зеркала и линейки приемников излучения ориентированы вдоль направления полета КА, что позволяет за один цикл строчной развертки (скан) радиометра сформировать микрокадр форматом 288×2350 элементов. Полоса перекрытия микрокадров составляет 10–40 элементов. При наземной обработке микрокадры подвергаются геометрической коррекции и «сшиваются» в единое трассовое изображение.

РИВР будет интегрирован с информационно-управляющей системой (ИУС) РС МКС, которая обеспечит передачу управляющих цифровых массивов и рассылку баллистических данных. Кроме того, с помощью ИУС будет осуществляться промежуточное хранение полученной от РИВР информации с последующим сбросом ее на Землю по широкополосной линии связи.

Использование в КЭ «Ураган» радиометра позволит получать трассовые изображения в инфракрасном диапазоне для решения широкого круга задач, таких как:

- мониторинг и прогноз техногенных и природных чрезвычайных ситуаций;
- обнаружение очагов лесных и подземных пожаров, крупных тепловых выбросов загрязняющих веществ в природную среду;
- мониторинг стихийных гидрометеорологических явлений;
- определение влажности почвы и уровня грунтовых вод;
- поиск подземных вод и геотермических источников;
- исследование динамических процессов на акваториях;
- различные виды тематического картографирования земной поверхности, в том числе геологическое картирование (поиск полезных ископаемых, их идентификация, обнаружение возможных районов газовых и нефтяных месторождений);
- исследование вулканической и сейсмической активности;
- оценка состояния полигонов для захоронения промышленных и бытовых отходов и их влияния на окружающую среду;
- обнаружение источников тепловых потерь, загрязнения и т.д.

Вся эта информация будет востребована Федеральной службой охраны леса, МЧС, экологическими и природоохранными службами, службами геологоразведки, а также региональными, отраслевыми и частными организациями.

В ходе КЭ на РС МКС будет также выполнена техническая обработка опытного образца ИК-радиометра высокого разрешения в штатных условиях эксплуатации для дальнейшего его применения в различных автоматических информационных комплексах ДЗЗ.

При реализации научной программы с использованием РИВР для заданного интервала планирования продолжительностью до нескольких суток или недель может быть составлено несколько связанных последовательностей наблюдений объектов, выбираемых из заданного общего каталога. Такие последовательности традиционно называются зонами наблюдений (экспериментов) [5]. Их информативность при планировании и проведении наблюдений с помощью радиометра рассчитывается следующим образом:

$$I_j = \sum_{i=1}^N p_i o_i l_i s_i z_{ij}, \quad j = 1, \dots, M,$$

где M и j – количество зон и их номера;

N и i – количество всех объектов в каталоге и их номера;

p_i – приоритет i -го объекта ($1 \leq p_i \leq 10$);

o_i – коэффициент облачности при наблюдении i -го объекта ($0 \leq o_i \leq 1$);

l_i – коэффициент освещенности при наблюдении i -го объекта;

s_i – коэффициент сканируемой площади объекта, $s_i = S'_i / S_i$, где S_i и S'_i – площадь объекта и площадь снимаемой части объекта;

z_{ij} – двоичный показатель наличия объектов в зонах экспериментов.

Если i -й объект каталога выбран для наблюдений в j -й зоне, значение z_{ij} равно единице, если не выбран, то нулю.

Если i -й объект находится на неосвещенной Солнцем части Земли, $l_i = 1$. Для освещенных Солнцем объектов: $l_i = 0$, если $h_i > h^{\max}$, и $l_i = (h^{\max} - h_i) / h^{\max}$ в остальных случаях. h_i – угол Солнца (угловая высота Солнца над местным горизонтом) для i -го объекта, h^{\max} – максимальный допустимый угол Солнца при съемке.

Измерительная информация в РИВР первоначально записывается на собственный регистратор, имеющий ограниченный объем. Количество включений прибора также имеет ограничение, что связано с ресурсом работы его системы охлаждения. Введем обозначения:

K_j – количество включений НА в j -й зоне;

V_j – объем информации, получаемой в j -й зоне;

K^o – ограничение сверху на количество включений НА;

V^o – ограничение сверху на объем информации, которое определяется емкостью записывающего устройства (ЗУ) НА;

I^o – ограничение снизу на суммарную информативность выбранных зон;

x_j – j -я компонента двоичного вектора \mathbf{X} , которая равна 1, если j -я зона выбрана для проведения эксперимента, и равна 0 в противном случае.

В процессе полета РС МКС возможны следующие постановки задачи оптимизации съемки:

- 1) максимизация информативности при заданных ограничениях на количество включений НА и объем информации для записи в ее записывающее устройство. В этом случае требуется найти вектор \mathbf{X} , максимизирующий целевую функцию

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M I_j x_j$$

при ограничениях $\sum_{j=1}^M K_j x_j \leq K^o$ и $\sum_{j=1}^M V_j x_j \leq V^o$;

- 2) минимизация объема информации для записи в ЗУ при ограничении на информативность и количество включений. Требуется найти вектор \mathbf{X} , минимизирующий целевую функцию

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M V_j x_j$$

при ограничениях $\sum_{j=1}^M I_j x_j \geq I^o$ и $\sum_{j=1}^M K_j x_j \leq K^o$;

- 3) минимизация количества включений при ограничении на информативность и количество информации для записи в ЗУ. Требуется найти вектор \mathbf{X} , минимизирующий целевую функцию

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M K_j x_j$$

при ограничениях $\sum_{j=1}^M I_j x_j \geq I^o$ и $\sum_{j=1}^M V_j x_j \leq V^o$.

В качестве примера ниже представлена программа наблюдений для РИВР, оптимизированная с помощью изложенного подхода. Условия проведения наблюдений в

период июля 2022 г. моделировались для реальных объектов КЭ «Ураган» и «Сценарий», в том числе пожаров.

Для выбранных объектов были рассчитаны информативность и затрачиваемые ресурсы зон (приведены в табл. 1). За зону были приняты 1 сутки, т.е. рассматривались каждые сутки в июле 2022 г. Для каждой зоны указана заполняемость ЗУ – доля объема ЗУ, занимаемая информацией, полученной в данной зоне.

Таблица 1

Информативность и затрачиваемые ресурсы зон

Зона	Информативность зоны	Кол-во включений НА	Заполняемость ЗУ НА	Объем информации в зоне, Гб
1	20,10	9	15%	37,50
2	23,70	8	13%	33,33
3	23,45	12	20%	50,00
4	24,95	9	15%	37,50
5	31,85	10	17%	41,67
6	30,85	11	18%	45,83
7	24,50	13	22%	54,17
8	24,50	9	15%	37,50
9	21,85	8	13%	33,33
10	25,50	12	20%	50,00
11	24,33	13	22%	54,17
12	29,05	11	18%	45,83
13	23,70	7	12%	29,17
14	26,20	12	20%	50,00
15	20,45	13	22%	54,17
16	22,75	10	17%	41,67
17	29,10	9	15%	37,50
18	25,55	15	25%	62,50
19	23,35	11	18%	45,83
20	25,60	9	15%	37,50
21	21,95	7	12%	29,17
22	21,10	14	23%	58,33
23	31,30	9	15%	37,50
24	32,40	10	17%	41,67
25	29,35	9	15%	37,50
26	26,80	13	22%	54,17
27	22,55	9	15%	37,50
28	23,95	9	15%	37,50
29	24,90	11	18%	45,83
30	26,25	13	22%	54,17
31	29,00	9	15%	37,50

Решалась задача максимизации информативности при ограничениях на количество включений НА и объем информации для записи в ее ЗУ. Для ускорения проверки были взяты простые ограничения на количество включений ($K^o = 300$) и объем информации для записи в собственную память НА ($I^o = 1300$):

$$X = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\},$$

$$L(X) = 749,325.$$

Для проверки решение также было получено с помощью машинного перебора всех вариантов. При нахождении оптимального решения методом полного перебора требуется на три порядка больше машинного времени. При дальнейшем увеличении количества зон или объектов в зонах, а также добавлении дополнительных ограни-

чений будет возрастать и разница в скорости между обсуждаемыми способами решения, и в итоге будет невозможно решить эту задачу прямым перебором на обычном персональном компьютере.

Оптимизация программы наблюдений, выполняемых с помощью гиперспектрометра

В настоящее время в рамках КЭ «Ураган» с целью дальнейшего развития системы мониторинга Земли создан и готовится к отправке на борт РС МКС гиперспектрометр [2], предназначенный для съемки земной поверхности. Этот прибор изготовлен МФТИ и АО «НПО «Лептон». Обработка результатов съемки, выполненной с помощью гиперспектрометра, может осуществляться на борту с участием космонавта. Это повысит эффективность анализа полученных данных и качество планирования наблюдений, а также сократит потоки данных, оперативно передаваемых на Землю.

Аппаратура предназначена для регистрации и обработки гиперспектральных изображений земной поверхности в нескольких спектральных каналах (по выбору космонавта от 1 до 100 из 180) в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, а также для получения панхроматических изображений с целью визуализации заданной области земной поверхности.

Гиперспектрометр позволит выполнить:

- оценку состояния лесных угодий;
- поиск и оценку концентрации различных минералов на обнаженных участках почвы;
- оценку состояния сельскохозяйственных посевов;
- обнаружение загрязнения растительности и воды нефтью, мазутом и т.д., а также определение нанесенного этими факторами ущерба;
- построение карт концентрации хлорофилла в приповерхностных водах;
- обнаружение участков наркотических растений среди другой растительности и т.д.

Для планирования наблюдений с помощью гиперспектрометра применен подход, аналогичный разработанному для исследований с РИВР. При этом следует отметить, что гиперспектрометр устанавливается на иллюминатор №9 модуля СМ и требует участия экипажа для монтажа/демонтажа и при работе в ручном режиме для выдачи команд управления (задание углов наведения, времени начала и конца съемки). В связи с этим время работы экипажа в ходе экспериментов с гиперспектрометром и период использования иллюминатора №9, который необходим и для других исследований, рассматриваются как нужные ресурсы. Поскольку прибор работает в видимом и ближнем ИК-диапазонах, его применение возможно только при наличии освещенности исследуемых объектов.

Информативность j -й зоны при использовании гиперспектрометра имеет вид:

$$I_j = \sum_{i=1}^N p_i o_i l_i s_i z_{ij}, \quad j = 1, \dots, M.$$

В данном случае $l_i = 1 - |h_i^{opt} - h_i| / h_i^{opt}$, где h_i и h_i^{opt} – угол Солнца и оптимальный угол Солнца для i -го объекта. Остальные параметры аналогичны тем, что были за-

нашей страны, имеющей обширную территорию, при использовании космической техники важным является наблюдение и изучение наземных объектов. Предназначенные для этого НА и технологии обрабатываются в КЭ «Ураган» на РС МКС. Для функционирующей на борту РС МКС и доставляемой на орбиту новой НА разработаны методы ее наведения на наблюдаемые объекты, что позволяет оптимизировать программы выполнения исследований с этой аппаратурой. Благодаря предложенному подходу к оптимизации и методам планирования наблюдений с использованием новой НА с учетом новых критериев информативности и ограничений можно значительно повысить эффективность программы наблюдений.

Предложенные методы оптимизации наблюдений с помощью НА КЭ «Ураган» реализованы в виде специального ПО, которое реализовано на борту РС МКС. Ряд программ задействуется в наземном комплексе для оперативной подготовки предложений по планированию наблюдений. За счет применения методов оптимизации научных программ повышается эффективность исследований на МКС. Описываемый в статье подход весьма важен и для перспективных орбитальных станций и автоматических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев М.Ю.** Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
2. **Беляев М.Ю.** Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
3. **Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Голубев Ю.В., Ломако А.А., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А.** Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2018. № 4 (23). С. 70–80.
4. **Акимов Н.П., Беляев М.Ю., Гектин Ю.М., Есаков А.М., Зайцев А.А., Серебряков Д.С., Черемисин М.В., Коган С.Д.** Использование инфракрасного радиометра высокого разрешения для исследования потенциально опасных и катастрофических явлений и объектов на земной поверхности в эксперименте «Ураган» на МКС // Труды ЛП Научных чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». г. Калуга, 19–21 сентября 2017. Казань, 2018. С. 22–30.
5. **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.
6. **Stefanov, W.L., Evans, C.A., Runco, S.K., Wilkinson, M.J., Higgins, M.D., Willis, K.,** Astronaut Photography: Handheld Camera Imagery from Low Earth Orbit, *Handbook of Satellite Applications*, Springer, New York, NY, 2016, pp. 683–728.
7. **Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Гусев В.Ф., Десинов Л.В., Иванов В.А., Крот Ю.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сосенко В.А.** Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 2. С. 12–20.
8. **Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Иванов Д.А., Катковский Л.В., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силюк О.О., Шукайло В.Г.** Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть I. Методика для спектров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 213–222.
9. **Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Иванов Д.А., Катковский Л.В., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силюк О.О., Шукайло В.Г.** Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234.

10. **Александрин А.И., Щербатюк А.Ф.** О мониторинге морских рыбопромысловых районов с использованием спутниковых данных и информации от морских робототехнических комплексов // Управление большими системами. 2022. Вып. 100. С. 237–260.
11. **Петунов 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. Екб: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 247 с.
12. **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.
13. **Cheikhrouhou, O., Khouf, I.,** A Comprehensive Survey on the Multiple Travelling Salesman Problem: Applications, Approaches and Taxonomy, *Computer Science Review*, 2021, vol. 40(4): 100369, pp. 1–76.
14. **Jayarathna, D.G. N. D., Lanel, G.H. J., Juman, Z.A. M.S.,** Survey on Ten Years of Multi-Depot Vehicle Routing Problems: Mathematical Models, Solution Methods and Real-Life Applications, *Sustainable Development Research*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 36–47.
15. **Vilorina, R.D., Solano-Charris, E.L., Munoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J.R.,** Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review, *International Transactions in Operational Research*, 2020, Corpus ID: 2164644493, pp. 1–32.
16. **Кензин М.Ю., Бычков И.В., Максимкин Н.Н.** Координация группы мобильных роботов при осуществлении комплексного мониторинга большой продолжительности // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Труды. М.: ИПУ РАН, 2019. С. 2351–2356.
17. **Yu, W., Lu, L.,** A Route Planning Strategy for the Automatic Garment Cutter Based on Genetic Algorithm, 2014 *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Beijing, China, pp. 379–386.
18. **Малышев В.В., Дарнопых В.В.** Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи. М.: Издательство МАИ, 2017. 296 с.
19. **Zhang, G., Li, X., Hu, G., Zhang, Z., An, J., Man, W.,** Mission Planning Issues of Imaging Satellites: Summary, Discussion, and Prospects, *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2021, Article ID 7819105, pp. 1–20.
20. **Максимов А.Н., Максимов Н.А.** Разработка и описание математической модели прокладки маршрута полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (ПИТ 2018). Под редакцией С. А. Прохорова. Самарский научный центр РАН. 2018. С. 418–490.
21. **Беляев М.Ю.** Основные задачи и принципы построения наземно-бортового комплекса управления экспериментами, проводимыми с помощью космических аппаратов // Управляющие системы и машины. № 4. «Наукова думка». Киев. 1980. С.103–107.
22. **Беляев М.Ю.** Оперативное планирование научных экспериментов, проводимых с помощью КА // Космические исследования. 1980. № 2. С. 235–241.
23. **Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваяев Д.Ю., 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.
24. **Toth, P., Vigo, D.,** Vehicle Routing. Problems, Methods, and Applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, *Mathematical Optimization Society*, 2014. Second Edition, 463 p.
25. **Городецкий В. И., Карсаев О. В.** Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 2 (187). С. 234–247.
26. **Саймон Д.** Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020, 1002 с.
27. **Беляев М.Ю.** От ракеты Р-7 и первого полета человека в космос до постоянной пилотируемой орбитальной станции // Гирокоспия и навигация. 2021. Т. 29. № 3 (114). С. 96–121.

Belyaev, M.Yu. (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, PJSC, Korolev, Moscow Region, Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi, Moscow Region, Russia), **Borovikhin, P.A., Esakov, A.M., Karavaev, D.Yu., and Rasskazov, I.V.** (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, PJSC, Korolev, Moscow Region). Optimization of Scientific Equipment Pointing at Survey Targets in the Uragan Experiment on board the International Space Station. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 118–137.

Abstract. *The aim of the Uragan space experiment on board the International Space Station (ISS) is to adjust the scientific equipment and improve the methods for monitoring various objects and phenomena on the Earth. Part of this scientific equipment is already operated on board the station, and the other part is planned to be delivered in the orbit soon. In contrast to the Russian orbital stations Salyut and Mir, the ISS was not designed for pointing the installed equipment at the survey targets, because the gyrodines used on the American segment for the ISS attitude control had a too small kinematic momentum. For this reason, special methods and devices had to be developed for pointing the Uragan scientific equipment at the survey targets. This paper considers the methods for pointing the scientific equipment, which would optimize the research program of the Uragan experiment on board the ISS.*

Key words: International Space Station (ISS), Uragan space experiment, scientific equipment, pointing, optimization, steerable platform.

Материал поступил 28.09.2023