

УДК 629.786.2:519.242.5

## НАВЕДЕНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

© 2022 г. М. Ю. Беляев<sup>1, 2, \*</sup>, П. А. Боровихин<sup>1</sup>, А. М. Ветошкин<sup>2</sup>,  
Д. Ю. Караваяев<sup>1</sup>, И. В. Рассказов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва, Москва, Россия

<sup>2</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*mikhail.belyaev@rsce.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Представлена технология наведения научной аппаратуры на исследуемые объекты с помощью подвижной платформы, доставленной на борт Российского сегмента *МКС*. Обсуждается задача оптимизации наведения научной аппаратуры с применением нескольких платформ наведения, которые будут доставлены на *МКС*, предлагаются пути ее решения на основе аналогии с задачей нескольких коммивояжеров.

DOI: 10.31857/S0023420622010010

### ВВЕДЕНИЕ

Выполнение многих экспериментов на 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* значительно превосходят аналогичные параметры предыдущих орбитальных станций. Для управления ориентацией *МКС* используются установленные на американском сегменте гиродины, которые не обладают располагаемым кинетическим моментом, достаточным для наведения НА станции на исследуемые объекты. Использование для этих целей двигателей управления ориентацией Российского сегмента (РС) станции потребует слишком больших затрат топлива в силу отмеченных выше больших размеров и массы *МКС*. Поэтому полет *МКС* происходит в орбитальной ориентации, при этом для разгрузки гиродинов периодически выполняются небольшие повороты станции. При создании *МКС* основное внимание в программах ученых на американском сегменте уделялось экспериментам в области

микрогравитации и медицинским исследованиям, что не требует специальной ориентации станции. В случае необходимости, наведение научной аппаратуры на исследуемые объекты, в том числе при фотографировании земной поверхности через иллюминаторы, в начальный период полета *МКС* активно выполнялось экипажами российского и американского сегментов станции.

Экипажи в процессе полета, однако, должны выполнять большое количество других операций, связанных с обслуживанием станции, проведением разнообразных исследований, а также решать бытовые вопросы и спать. Поэтому возникла задача наведения научной аппаратуры *МКС* на изучаемые объекты без участия экипажа.

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” разработана система ориентации видеоспектральной аппаратуры (“СОВА”), предназначенная для установки на иллюминаторы внутри обитаемого пространства 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* может

быть использовано несколько ППН. Это приводит к усложнению задачи оптимального планирования наблюдений исследуемых объектов. В данной статье рассматриваются применяемые методы и перспективные пути решения этой задачи при проведении КЭ по наблюдению различных исследуемых объектов.

Бортовое программное обеспечение, предназначенное для планирования и сопровождения КЭ, разрабатывалось в первую очередь для дистанционного зондирования Земли, однако в нем предусмотрен также расчет и отображение положения 5050 наиболее ярких звезд, Солнца, Луны, планет, а также искусственных спутников Земли. Эти функции использовались при планировании, проведении и обработке результатов некоторых КЭ при штатной ориентации *МКС* и могут получить более широкое применение в астрономических КЭ в случае временного переориентирования *МКС* из орбитальной в инерциальную систему координат или при установке на *МКС* специальной ППН для астрономических экспериментов. Для этих целей могут быть также адаптированы методы, применяемые при планировании и проведении наблюдений наземных объектов.

### ОПТИМИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОЙ ПЛАТФОРМЫ НАВЕДЕНИЯ

В декабре 2019 г. на борт *МКС* был доставлен один комплект системы “СОВА”, представляющий собой конструкцию, выполняющую функции двухступенной платформы наведения, которая на время выполнения КЭ монтируется экипажем внутри РС *МКС* на иллюминаторе диаметром 426 мм и на которой, в зависимости от целей эксперимента, размещается фотоаппарат либо видеоспектральная система. В данном варианте конструкции (“СОВА-1”) изменение оси визирования прибора, неподвижно закрепленного на платформе, осуществляется благодаря поворотам подвижного зеркала [3]. Использование платформы “СОВА-1” позволяет производить фотосъемку и спектрометрирование объектов исследования по трассе полета в зоне подстилающей поверхности при углах визирования до  $\pm 30^\circ$  от оси, перпендикулярной иллюминатору.

Управление платформой наведения и установленной на ней НА может производиться с бортового ноутбука как экипажем в автоматизированном режиме, так и автоматически по заранее заданной программе. В перспективе предусматривается удаленный автоматизированный режим управления с Земли.

ППН “СОВА-1” была использована при выполнении нескольких КЭ по съемке объектов на поверхности Земли. Использование дополни-

тельных комплектов ППН позволяет выполнять наблюдения также и внеземных объектов, так как ППН устанавливаются на иллюминаторы, обращенные при штатной ориентации *МКС* в различных направлениях.

При планировании съемок аппаратурой, установленной на платформе “СОВА-1”, применяется традиционный подход, который использовался для различных КЭ еще на станциях типа *Салют* и затем на станции *Мир* и *МКС* [1, 4–6]. Он состоит в сведении задачи планирования к целочисленной либо частично целочисленной задаче линейного программирования.

В рамках указанного подхода составляется линейная целевая функция для оценки информативности, т.е. объема и качества полезной научной информации, ожидаемой в результате выполнения программы КЭ. Кроме того, в виде линейных уравнений и неравенств формализуются различные условия и ограничения, которые накладываются на программы съемок.

Пусть задан нумерованный список объектов, рекомендуемых для наблюдений, причем одни и те же цели, наблюдаемые с *МКС* на разных витках, считаются разными объектами. Тогда каждому объекту с порядковым номером  $i$  приписывается бинарная переменная  $o_i$ , которая принимает значение 1, если данный объект включен в программу съемок, и 0, если объект из программы исключен.

В алгоритмах управления ППН “СОВА” модернизированной целевой функцией информативности  $I$ , значение которой должно быть максимизировано при планировании наблюдений, является свертка нескольких критериев следующего вида:

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

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 КЭ. Так, при дневных фотосъемках земной поверхности, как правило, используются три функции [7]: 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.

В случае астрономических наблюдений в состав целевой функции информативности могут быть включены приоритеты объектов и функций,

зависящие, например, от яркости и спектрального класса наблюдаемых звезд.

В виде линейных уравнений или неравенств формулируются различные ограничения [5, 6], например, условия прямой видимости объектов, светотеневая обстановка, необходимая для наблюдений, совместимость объектов в рамках программы наблюдений, пределы расходования каких-либо ресурсов аппаратуры и так далее.

Один из базовых режимов съемки обеспечивает отслеживание объекта в течение интервала времени заданной продолжительности. Если съемка производится лишь одним комплектом НА, так что одновременная съемка нескольких объектов невозможна, необходимо ввести линейные ограничения, исключающие наличие в одной и той же программе съемок таких объектов, заданные интервалы отслеживания которых пересекаются [7].

Положим, что с учетом введенных ограничений и ожидаемой информативности результатов сформирован список объектов для наблюдений. Пусть в рамках одного сеанса эксперимента планируются последовательные наблюдения всех выбранных объектов одним комплектом НА, либо их синхронное наблюдение несколькими комплектами, и при этом выдвигается требование минимизировать сумму углов разворотов аппаратуры наведения при переходах от объекта к объекту. Считаем также, что ресурсов аппаратуры и носителей, на которые записывается информация во время съемок, достаточно для выполнения съемок в полном объеме. При этом, независимо от того, должна ли ППН после завершения всех разворотов вернуться в исходное положение, выбор оптимального закона наблюдения сводится к решению известной задачи коммивояжера [1], которая в терминах теории графов состоит в нахождении гамильтонова цикла (контура) с минимальной суммой стоимостей проходимых ребер (дуг) графа [8].

Обычным условием при планировании КЭ является то, что каждому объекту соответствует интервал, задаваемый временем его начала и временем его окончания, в пределах которого возможна съемка данного объекта. Интервалы наблюдения для разных объектов могут перекрываться, но, вообще говоря, не совпадают друг с другом. Оптимизация наблюдений в этом случае соответствует задаче коммивояжера с ограничениями по времени (временными окнами). Она, как и задача коммивояжера без указанных ограничений, может быть точно решена, например, методами целочисленного программирования [9], но при этом вычислительные затраты быстро растут с увеличением количества объектов наблюдения. В настоящее время изучается практическая эффективность приближенных эвристических методов, в частно-

сти алгоритмов, созданных на основе биоинспирированных метаэвристических методов (генетического [10] и муравьиного [11]), которые не гарантируют оптимального результата в строгом смысле слова, но могут давать приемлемые решения, близкие к оптимальным, для относительно масштабных задач, аналогичных задаче коммивояжера, в том числе и с временными окнами.

Бортовое программное обеспечение решает задачи планирования (включая подбор объектов с максимальной ожидаемой информативностью съемки и решение задачи коммивояжера) используя баллистические расчеты и различные алгоритмы оптимизации. Выбор наиболее эффективных решений в простейших случаях производится перебором, а при возрастании количества вариантов – с использованием метода ветвей и границ [1, 5], а также приближенных методов.

На рис. 1 представлен результат поиска последовательности наблюдений 50 заданных астрономических объектов, для которой сумма углов разворота ППН близка к минимальной. Данное решение найдено с помощью алгоритма, основанного на метаэвристике, моделирующей деятельность муравьиной колонии по поиску оптимальных путей к источникам пищи [12]. Выбор начального объекта последовательности не задан априорно, а производится алгоритмом. Считается, что ориентация станции во время наблюдений остается неизменной относительно некоторой инерциальной системы координат. Оси абсцисс и ординат на рис. 1 соответствуют угловым отклонениям  $\alpha$  и  $\beta$  (в градусах) оси визирования НА, установленной на ППН, в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Переходы оси визирования от объекта к объекту схематично представлены прямыми линиями. Объекты  $P_j$  ( $j = 1, \dots, 50$ ) пронумерованы в порядке наблюдения от начального объекта  $P_1$  до последнего  $P_{50}$ . Перед началом серии наблюдений ППН разворачивается из нейтрального положения так, чтобы направить ось визирования НА на объект  $P_1$ , и по завершении наблюдений объекта  $P_{50}$  возвращается в исходное положение. Наблюдения могут производиться и в обратном порядке, начиная с объекта  $P_{50}$ .

### ОПТИМИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ ПЛАТФОРМ НАВЕДЕНИЯ

В настоящее время в рамках КЭ “Ураган” РКК “Энергия” и НИИПФП им. А.Н. Севченко готовят к доставке на борт РС МКС новые комплекты аппаратуры “СОВА”, в том числе поворотные платформы типа “СОВА-2”. В этом варианте конструкции изменение направления оси визирования осуществляется путем разворота самóй

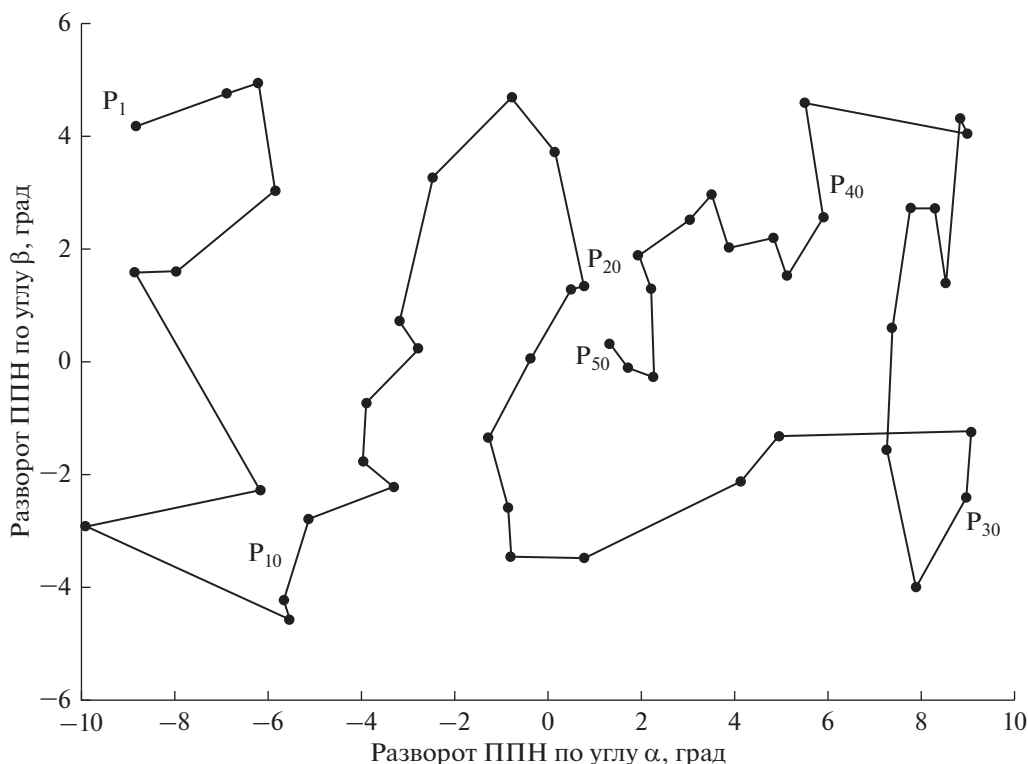


Рис. 1

НА с помощью специальных механических приводов – линейных актуаторов [3].

Платформы “СОВА-1” и “СОВА-2” способны обслуживать одни и те же виды НА, однако при установке на платформу “СОВА-2” более высокий приоритет отдается приборам, имеющим меньшие моменты инерции относительно осей поворота, а также аппаратуре, чувствительной к наличию металлических зеркал, входящих в состав платформы “СОВА-1”.

ППН “СОВА-2” может быть изготовлена в двух вариантах, один из которых функционирует как двухстепенная платформа наведения, а другой обеспечивает отклонение оси визирования НА только в одной заданной плоскости.

Каждый из указанных вариантов платформы “СОВА” имеет две модификации для установки на два вида иллюминаторов – диаметром 426 и 228 мм, при этом для первого вида иллюминаторов обеспечивается угол отклонения от оси иллюминатора около  $\pm 30^\circ$ . Модификации, предназначенные для иллюминаторов второго вида, обеспечивают меньший угол отклонения, но не менее чем  $\pm 20^\circ$ .

Таким образом, из-за ограничений, определяемых размерами иллюминаторов, предельные углы отклонения оси визирования аппаратуры, управляемой с помощью системы “СОВА”, значительно меньше тех, которые в принципе могли

бы обеспечить поворотные платформы, установленные на наружной поверхности МКС [13], что ограничивает некоторые возможности планирования и выполнения съемок. С другой стороны, использование ППН типа “СОВА” внутри МКС имеет такие преимущества, как относительная простота их конструкции, а также удобство их обслуживания и эксплуатации.

Один из подходов, успешно применявшихся при планировании программ наблюдений продолжительностью до нескольких суток одним комплектом НА, состоит в том, чтобы составить различные связанные последовательности наблюдений, так называемые зоны наблюдений, охватывающие заданный интервал планирования. Каждой зоне приписывается значение интегрального линейного критерия эффективности, а условия совместимости зон и прочие ограничения формулируются в виде линейных неравенств. Тогда выбор наиболее эффективных сочетаний зон наблюдений на выбранном интервале может быть произведен методами целочисленного или частично целочисленного линейного программирования [14]. Тот же подход может применяться при использовании нескольких ППН, способных независимо друг от друга наводить разные комплекты НА на заданные объекты.

Один из вариантов такого подхода к оптимальному планированию наблюдений несколькими

комплектами НА заключается в том, чтобы использовать возможные зоны наблюдений, каждая из которых составлена лишь для одного комплекта. Так, при использовании нескольких идентичных ППН “СОВА” выбираются такие наборы (по числу ППН) сформированных для них отдельно зон наблюдений, которые дают наибольшую суммарную информативность экспериментов. Сформулируем эту задачу, используя условия, аналогичные предложенным для описания задачи маршрутизации транспорта в ее “экстенсивной” формулировке, когда основными объектами рассмотрения являются всевозможные маршруты, из множества которых производится выбор наиболее эффективного набора [15].

Пусть для наблюдений задан общий список из  $N$  объектов, упорядоченных по какому-либо признаку и обозначаемых  $b_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). Разными объектами считаются не только цели с различными координатами, но и одни и те же цели, наблюдаемые в разное время. В соответствии с баллистическим прогнозом полета, заданными ограничениями и рекомендациями разработчиков КЭ формируется набор из  $M$  возможных зон наблюдения объектов. Каждая зона наблюдения с номером  $r$  ( $r = 1, \dots, M$ ) представляет собой список выбранных для данной зоны неповторяющихся объектов из общего списка, для которых сохраняется то же отношение порядка, что и в общем списке:  $(p_1^r, p_2^r, \dots, p_{N_r-1}^r, p_{N_r}^r)$ , где  $N_r$  – число объектов, выбранных для данной зоны  $r$ , а на месте каждого  $p_k^r$  ( $k = 1, \dots, N_r$ ) стоит некоторый объект  $b_i$  (с определенным значением номера  $i$ ) из заданного общего списка. Каждой зоне приписывается вычисленная для нее согласно заданным критериям величина информативности наблюдений  $c_r$ . Число используемых ППН обозначим  $K$ .

Потребуем выбрать зоны наблюдений – по одной для каждой ППН – так, чтобы ни один из объектов наблюдения не содержался более чем в одной из выбранных зон. При этом суммарная информативность выбранных зон должна быть максимальной.

Вводятся бинарные переменные  $x_r$  ( $r = 1, \dots, M$ ), соответствующие зонам наблюдений, такие что:

$$x_r = \begin{cases} 1 - \text{зона наблюдений } r \text{ выполняется} \\ \text{(планируется к проведению)} \\ 0 - \text{зона } r \text{ не выполняется.} \end{cases}$$

Введем также бинарный коэффициент  $a_{ir}$ , который равен 1, если объект  $b_i$  выбран для наблюдений в зоне  $r$ , а в противном случае равен 0.

Требуется определить вектор  $X = \{x_r, r = 1, \dots, M\}$ , доставляющий максимум целевой функции:

$$P(X) = \sum_{r=1}^M c_r x_r, \quad (2)$$

при следующих условиях:

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

$$1^T X = K. \quad (4)$$

В качестве  $c_r$  можно использовать выражение вида (1). В простейшем случае под  $c_r$  понимается количество объектов, выбранных для наблюдения в зоне с номером  $r$ . Тогда согласно (2) максимизируется суммарное число объектов во всех выбранных зонах.

Условие, чтобы каждый объект содержался во всех выбранных зонах не более одного раза, предписывается уравнением (3) и приводит к тому, что в оптимальный набор зон могут войти не все заданные объекты из общего списка. Однако более сильное условие  $\sum_{r=1}^M a_{ir} x_r = 1$  может привести к тому, что у задачи не будет решения, например, если число подготовленных зон наблюдения недостаточно велико или вследствие каких-либо дополнительных ограничений.

Если допускается, чтобы объекты входили сразу в несколько выбранных зон, условие (3) заменяется парой условий вида:  $\sum_{r=1}^M a_{ir} x_r \geq W_i$ ,  $\sum_{r=1}^M a_{ir} x_r \leq U_i$ , где  $W_i$  и  $U_i$  – допустимые пределы вхождений в разные зоны объекта с порядковым номером  $i$ .

Тогда при проведении КЭ, можно либо разрешить одновременную съемку этих объектов в разных зонах, либо исключить их из некоторых зон. При этом должен быть решен вопрос об изменениях оценок информативности как отдельных зон, выбранных в качестве решения, так и их суммы.

Условие (4) требует, чтобы в наблюдениях были задействованы все  $K$  из имеющихся ППН. Допустить уменьшение их числа, если это не снижает значения целевой функции (2), можно, заменив данное условие на  $1^T X \leq K$ .

Если используемые ППН отличаются друг от друга по характеристикам (например, обеспечивают разные максимальные угловые скорости разворота или имеют разные пределы угловых отклонений оси визирования НА) так, что разным ППН соответствуют разные наборы возможных зон наблюдений, то это учитывается путем незначительных изменений условия (3).

Условия задачи для конкретных КЭ могут дополняться другими ограничениями в виде линей-

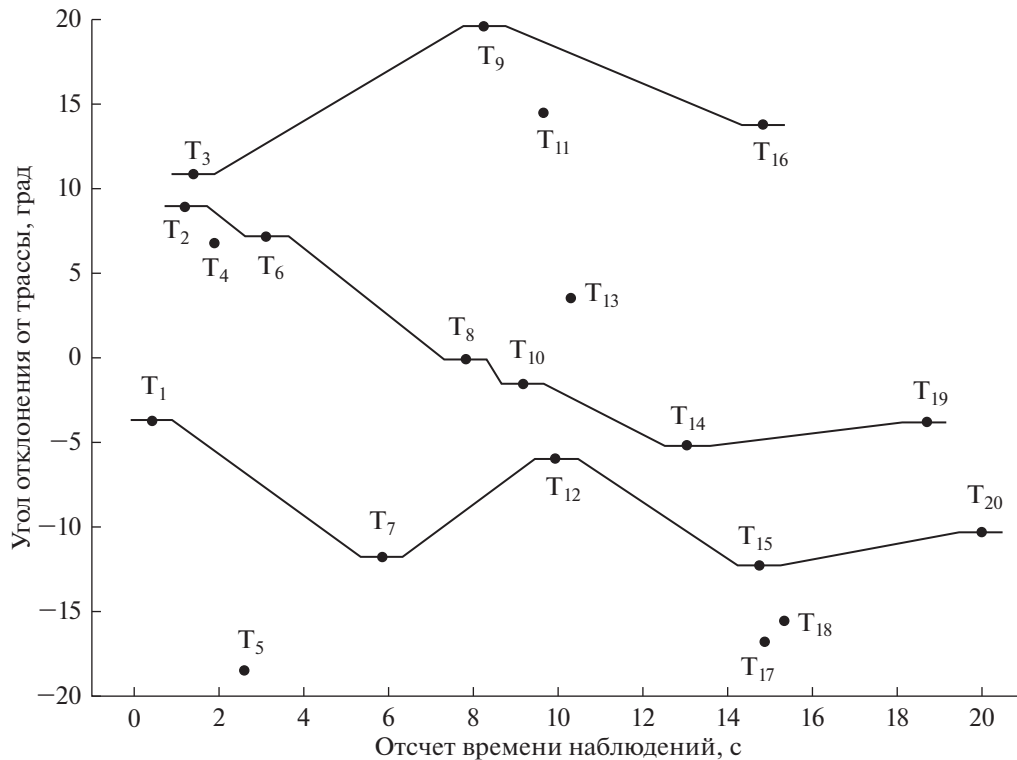


Рис. 2. Схема наблюдений 14 объектов из 20 заданных с помощью трех ППН “СОВА-2”.

ных уравнений и неравенств, однако некоторые ограничения, не обязательно линейные, уже присутствуют в формулировке, приведенной выше, в неявном виде, поскольку они учитываются при формировании возможных зон наблюдений.

Если с учетом всех ограничений сформированы все возможные последовательности наблюдений заданных объектов каждым комплектом аппаратуры, то точное решение задачи, заданной выражениями (2)–(4), дает оптимальную программу наблюдений несколькими комплектами НА, но при увеличении числа объектов и комплектов аппаратуры быстро возрастают вычислительные затраты. Их можно снизить, сократив набор возможных зон (например, по эвристическим соображениям) или используя приближенные методы решения, при этом результат может иметь практическую ценность при планировании экспериментов, но оптимальное решение в этом случае не гарантировано.

Если существует оптимальное или практически приемлемое решение задачи, сформулированной выше, оно представляет собой набор из  $K$  зон наблюдений объектов, упорядоченных по выбранному признаку. При планировании экспериментов по дистанционному зондированию Земли объекты обычно упорядочиваются по временам их максимального сближения с *МКС* и в таком же порядке производятся их наблюдения с борта *МКС* во всех выбираемых зонах. Алгоритм наведе-

дения оси визирования НА строится так, что ППН, переходя от одного объекта к другому, сначала выполняет разворот в направлении, перпендикулярном трассе полета *МКС*, до угла, равного угловому удалению очередного объекта от трассы, затем, поскольку платформа не одноступенчатая, выполняет разворот вдоль трассы, отслеживая объект в течение заданного времени, и переходит к наведению по той же схеме на следующий запланированный объект. Этот подход с минимальными изменениями может быть адаптирован к наблюдениям астрономических объектов через боковые иллюминаторы при орбитальной ориентации *МКС*. В этом случае некоторое выбранное “нейтральное” направление оси визирования НА, установленной на ППН, неподвижно относительно *МКС*, с течением времени описывает на небесной сфере близкую к окружности кривую, которую по аналогии со случаем наблюдения наземных объектов назовем трассой полета *МКС*. При этом каждый астрономический объект наблюдения, подобно наземному, характеризуется моментом его минимальной угловой удаленности от нейтрального направления оси визирования и величиной этой минимальной удаленности.

На рис. 2 трасса полета *МКС* условно представлена прямой, совпадающей с осью абсцисс. Вдоль этой прямой слева направо отсчитывается время полета *МКС* в секундах. 20 заданных объектов представлены на рис. 2 в виде точек  $T_j$ ,  $j = 1, \dots, 20$ .

Вертикальная координата каждой точки соответствует удаленности (в градусах) объекта от трассы, а горизонтальная — моменту времени, когда расстояние между объектом и *МКС* минимально. Наблюдения выполняются по следующему алгоритму: ППН производит разворот перпендикулярно трассе так, чтобы угол отклонения оси визирования от трассы стал равен углу отклонения объекта за 0.5 с до момента наибольшего сближения объекта с *МКС*, затем, через 0.5 с после указанного момента начинается разворот ППН перпендикулярно трассе для перехода к следующему объекту. Считаем, что платформа одноступенчатая и ее развороты производятся исключительно в плоскости, перпендикулярной трассе, а переход от объекта к объекту вдоль трассы происходит благодаря движению *МКС*.

При планировании наблюдений использовалось решение задачи линейного программирования в формулировке (2)–(4). Количество ППН  $K = 3$ , максимальная скорость разворота каждой ППН — 6 град/с (что соответствует характеристикам платформы “СОВА-2”). Максимизировалось общее количество объектов, наблюдаемых со всех платформ.

Полученное решение задачи показывает, что при заданных условиях невозможно выполнить наблюдения более чем 14 объектов. В данном случае из программ наблюдений оказались исключены объекты с номерами 4, 5, 11, 13, 17 и 18. При этом сумма разворотов всех трех ППН перпендикулярно трассе равна 103.38 град, если при расчете суммы учитывать для каждой ППН начальный переход из нейтрального положения к первому наблюдаемому объекту и возвращение в это положение после наблюдений последнего объекта. Однако данное решение не является единственным — поскольку не использовался метод полного перебора, оказались исключены все остальные варианты решений с тем же максимальным значением целевой функции и другими наборами из 6 объектов, не доступных для наблюдения. Среди этих вариантов с высокой вероятностью должны быть такие, для которых требуется меньшая сумма разворотов ППН за все время наблюдений, чем в найденном решении, что позволяет экономить технические ресурсы ППН.

На следующем этапе, чтобы найти вариант наблюдения 14 объектов с минимальной суммой разворотов ППН, задача линейного программирования (2)–(4) была переформулирована следующим образом.

Выражение (2) было преобразовано в дополнительное условие-ограничение:

$$\sum_{r=1}^M c_r x_r = 14, \quad (5)$$

где  $c_r$  — количество объектов в зоне  $r$ .

В качестве целевой функции использовалось выражение того же вида, что и (2):

$$P(X) = \sum_{r=1}^M s_r x_r, \quad (6)$$

где  $s_r$  — сумма разворотов ППН в зоне  $r$ .

Определялся вектор  $X$ , доставляющий минимум данной целевой функции.

В результате было получено решение, представленное на рис. 3. В этом случае сумма разворотов трех ППН составляет 89.77 град. Таким образом, сумма разворотов трех ППН по сравнению с предыдущим решением уменьшилась примерно на 13 процентов.

Поиск решения с наибольшей суммой разворотов путем максимизации функции (6) дает результат, равный 188.42 град. По сравнению с этим наилучшим вариантом решение, представленное на рис. 3, дает выигрыш около 52%.

Поставленные выше задачи не являются полными аналогами задачи нескольких коммивояжеров. Задача с целевой функцией (6) и ограничениями (3)–(5) является одним из вариантов более общей задачи маршрутизации транспорта [15].

Полную аналогию задачи наблюдений объектов с задачей нескольких коммивояжеров можно провести при выполнении ряда условий: требуется охватить наблюдениями все заданные объекты так, чтобы каждый объект попал в зону наблюдения ровно одного из комплектов НА, а сумма всех разворотов, произведенных соответствующими ППН, была минимальной. При этом технических ресурсов каждого комплекта должно быть достаточно, чтобы отследить все заданные объекты (что соответствует отсутствию ограничений на грузоподъемность транспортных средств).

Задача нескольких коммивояжеров может быть сведена к задаче одного коммивояжера на модифицированном графе, как для неориентированных [16], так и ориентированных [17] графов. При этом к исходным графам по специальным правилам добавляются  $K - 1$  новых вершин и новые ребра (дуги); в случае задачи о двух коммивояжерах достаточно добавить только новые дуги [16]. Могут использоваться и другие способы замены задачи нескольких коммивояжеров задачей одного коммивояжера. Так, множество объектов может быть разделено на  $K$  подмножеств, для каждого из которых решается отдельная задача коммивояжера. Еще один подход состоит в том, что для всех объектов решается задача одного коммивояжера, после чего полученный маршрут разрезается на  $K$  фрагментов, при этом может ставиться условие сбалансированности фрагментов по числу входящих в них объектов [18] или по продолжительности их наблюдения.

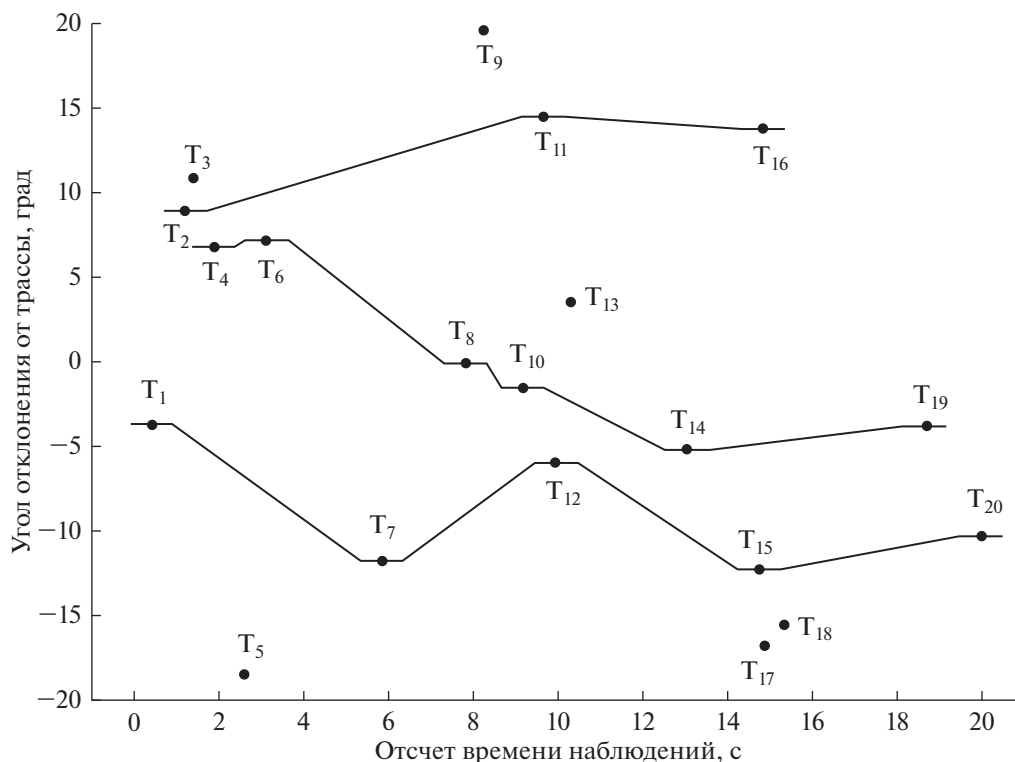


Рис. 3. Схема наблюдений 14 объектов из 20 заданных с помощью трех ППН “СОВА-2” с меньшей суммой разворотов платформ, чем решение, представленное на рис. 2.

Например, последовательность наблюдений в инерциальной системе координат, представленная на рис. 1, может быть произведена одним комплектом НА, установленным на ППН типа “СОВА-1”, которая обеспечивает угловую скорость разворота оси визирования величиной 1.5 град/с. Если требуется наблюдать каждый объект в течение 1 мин, то программа наблюдений 50 объектов (рис. 3) потребует 51 мин 24 с. Положим, светотеневые условия или продолжительность поддержания нужной ориентации станции не позволяют наблюдать объекты более 20 мин. В таком случае можно сократить перечень заданных объектов (например, оставив наиболее приоритетные), чтобы успеть отследить их одной (или двумя) ППН, либо распределить все 50 объектов между тремя ППН, разбив исходный маршрут на фрагменты, как показано на рис. 4. Объекты наблюдения обозначены  $P_j^k$ , где  $k$  – номер ППН, а  $j$  – нумерация, определяющая порядок наблюдения объектов с помощью данной ППН. Продолжительность наблюдений по полученным программам следующие: 16 мин 30 с для последовательности  $P_1^1 - P_{16}^1$ , 17 мин 30 с для  $P_1^2 - P_{17}^2$  и 17 мин 20 с для  $P_1^3 - P_{17}^3$ .

Подходы к решению задачи нескольких коммивояжеров, которые разрабатываются в теории

комбинаторной оптимизации, востребованы для решения широкого круга научно-исследовательских, производственных и логистических задач. Полученные при этом результаты целесообразно учитывать при разработке средств планирования наблюдений с борта *МКС* в случае, если эта задача с точки зрения формальной постановки в достаточной степени аналогична задачам, решаемым в других областях. Так, обнаруживается сходство задачи оптимизации наблюдения заданных объектов несколькими комплектами НА с задачами централизованного управления несколькими роботизированными транспортными средствами, включая летательные и подводные аппараты. В этой области имеется опыт поиска точных решений, например, модифицированным алгоритмом Хельда–Карпа, основанным на принципах динамического программирования [19], но особенно активно разрабатываются приближенные решения, позволяющие снизить вычислительные затраты до практически приемлемого уровня. К ним относятся, например, аукционный метод [19] и биоинспирированные генетические алгоритмы [20, 21]. Муравьиная метаэвристика также может быть адаптирована для решения задачи маршрутизации нескольких транспортных средств с временными окнами [22].



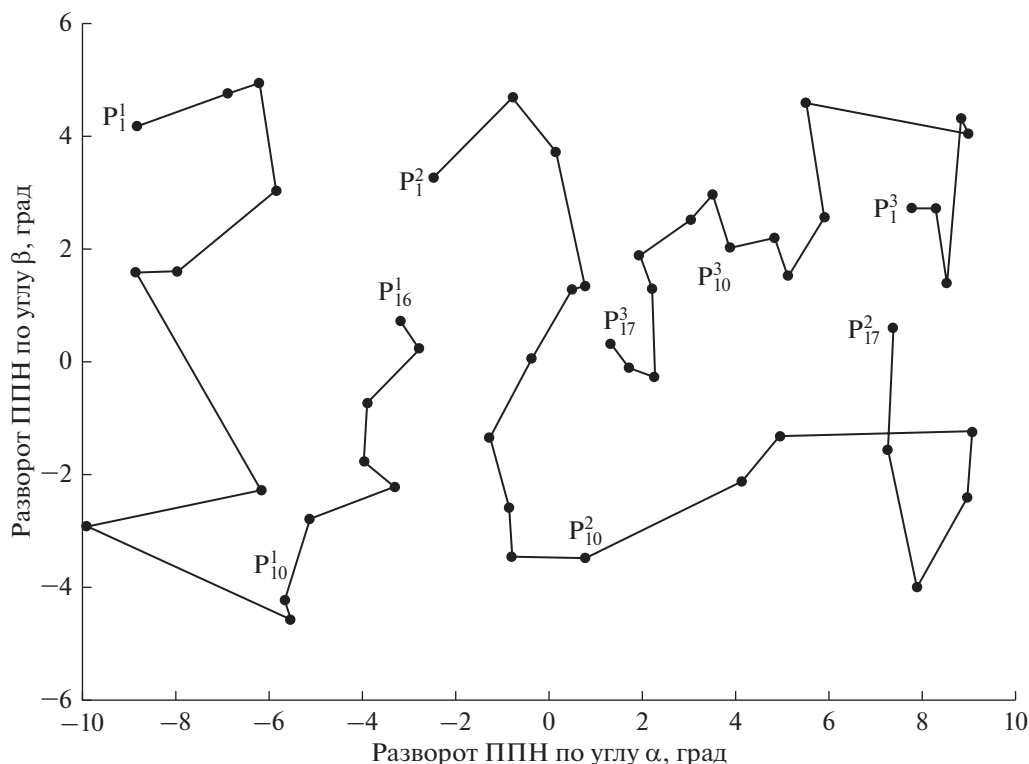


Рис. 4. Получено на основе решения задачи коммивояжера (рис. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программы научно-прикладных исследований орбитальных станций предусматривают наведение научной аппаратуры на исследуемые объекты. На отечественных орбитальных станциях *Салют* и *Мир* обычно жестко крепилась на корпусе станции и ее наведение на изучаемые объекты выполнялось с помощью разворотов всей станции. Размеры и масса *МКС* значительно превосходят аналогичные характеристики станций *Салют* и *Мир* и поэтому подобная технология не может использоваться на *МКС* для наведения исследовательской аппаратуры этой станции на изучаемые объекты. С этой целью в рамках КЭ “Ураган” для выполнения исследований были разработаны подвижные платформы наведения. Одна из таких платформ уже доставлена на борт *МКС*. При наведении на изучаемые объекты исследовательской аппаратуры, устанавливаемой на ППН, реализованы и используются оптимальные методы планирования наблюдений. Для выполнения наблюдений с помощью нескольких ППН, доставка которых планируется на *МКС*, в статье предложены методы, используемые при решении задачи нескольких коммивояжеров.

## 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* // *Космич. исслед.* 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 // *Космич. исслед.* 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 // *Космич. исслед.* 1987. № 1. С. 30–36.
6. *Беляев М.Ю., Рулев Д.Н.* Оптимизация планирования экспериментов, выполняемых на орбитальных станциях // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 3. С. 236–243.
7. *Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю.* Ожидаемое пространственное разрешение снимков как критерий эффективности при планировании съемок Земли. Труды LIV Чтений К.Э. Циолковского. Казань: Издательство Казанского университета, 2020.
8. *Gutin G., Punnen A.* The Traveling Salesman Problem and Its Variations. Springer, 2007.
9. *Рулев Д.Н., Рулев Н.Д.* Планирование наблюдений астрономических объектов с космического аппарата с учетом ограничений на моменты выполне-

- ния наблюдений // Космическая техника и технологии. 2019. № 1(24). С. 58–67.
10. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
  11. *Курейчик В.М., Мартынов А.В.* Об алгоритмах решения задачи коммивояжера с временными ограничениями // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 1(16). С. 1–16.
  12. *Dorigo M., Stutzler T.* Ant Colony Optimization. A Bradford Book, The MIT Press, 2004.
  13. *Носкин Г.В.* Бортовые поворотные платформы наведения, размещаемые на пилотируемых орбитальных космических станциях // Космические роботы, манипуляторы и системы наведения. 2015. Т. 12. Вып. 1–2. С. 213–226.
  14. *Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. и др.* Управление подвижными платформами при наведении научной аппаратуры на изучаемые объекты в эксперименте “Ураган” на *Международной космической станции*. Сборник материалов XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 2017.
  15. *Toth P., Vigo D.* Vehicle Routing Problems, Methods, and Applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, Mathematical Optimization Society, 2014.
  16. *Rao M.R.* A note on the multiple traveling salesman problem // Operations Research. 1980. V. 28. № 3. P. 628–632.
  17. *Bellmore M., Hong S.* Transformation of multisalesman problem to the standard traveling salesman problem // J. Association Computer Machinery. 1974. V. 21. P. 500–504.
  18. *Костюк Ю.Л., Пожидаев М.С.* Приближенные алгоритмы решения сбалансированной задачи  $k$  коммивояжеров // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2008. № 1(2). С. 106–112.
  19. *Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф.* Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. 2012. № 36. С. 262–284.
  20. *Подлипьян П.Е., Максимов Н.А.* Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769>
  21. *Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н. и др.* Эволюционные модели маршрутизации группового движения автономных подводных роботов при многоцелевом динамическом мониторинге морских акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2(18). С. 4–13.
  22. *Ellabib I., Basir O.A., Calamai P.* An Experimental Study of a Simple Ant Colony System for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Ant Algorithms, Third International Workshop, Belgium, 2002. P. 53–64.