

УДК 629.78.076.6:521.3:528.8
EDN OQNRPV

М. Ю. БЕЛЯЕВ, П. А. БОРОВИХИН, Д. Ю. КАРАВАЕВ

АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ В ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ И ОТРАБОТКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ВЕКТОР-Т» НА МКС ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ ПО СНИМКАМ ПЛАНЕТЫ

Развитие методов автономной навигации связано прежде всего с планировавшимися в 60-е гг. прошлого столетия лунными экспедициями. В дальнейшем эти методы отрабатывались на орбитальных станциях «Салют», «Мир» и Международной космической станции (МКС) в рамках эксперимента «Вектор-Т». В статье рассматривается одно из направлений данного эксперимента – определение и уточнение положения МКС по снимкам поверхности Земли, получаемым с помощью бортовой фотоспектральной системы. Приводится пример применения методики, отработанной в ходе эксперимента «Вектор-Т», для определения положения автоматической станции «Луна-25» по сделанному с нее снимку Луны.

Ключевые слова: Международная космическая станция, космический эксперимент «Вектор-Т», определение орбиты, автономная навигация, космические снимки, «Луна-25».

Введение

При решении многих задач баллистики, управления полетом и проведении космических экспериментов (КЭ) космический аппарат (КА) традиционно принимается за материальную точку. Однако современные орбитальные станции имеют настолько большие размеры, что ими уже нельзя пренебречь ни при прогнозировании их движения, ни в ходе ряда научных экспериментов на борту станции. Размеры Международной космической станции (МКС) сопоставимы с размерами футбольного поля. В связи с этим при расчете ее орбиты необходимо учитывать движение не только ее центра масс, но и вокруг центра масс, а также изменение формы станции, возникающее, например, вследствие вращения солнечных батарей.

В целях создания и отработки новых методов определения параметров движения крупногабаритных КА на МКС был организован КЭ «Вектор-Т», в котором для

Беляев Михаил Юрьевич. Доктор технических наук, профессор, руководитель космических экспериментов на МКС «Тензор», «Среда-МКС», «Вектор-Т», «Ураган», «Сценарий» и др., ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева (г. Королев, Московская обл.); заведующий кафедрой систем автоматического управления космического факультета, МФ 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 1-й категории, ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева».

Караваяев Дмитрий Юрьевич (1956–2024). Кандидат технических наук, ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева».

Статья по пленарному докладу на XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2024.

расчета орбиты дополнительно используются данные об ориентации станции и ее элементах, о движении спутников сферической формы, запускаемых снаружи, а также и внутри станции, измерениях спутниковых навигационных систем и т.д. Следует отметить, что в настоящее время особый интерес представляют новые методы автономного определения параметров движения КА [1]. Их актуальность связана с необходимостью обеспечить надежное определение параметров движения КА в случае возникновения каких-либо нештатных ситуаций при полетах как в околоземном пространстве, так и к Луне или Марсу. Подобные методы автономной навигации активно тестировались еще на станциях серии «Салют» [2, 3]. Одно из направлений космического эксперимента «Вектор-Т» связано с испытанием нового автономного подхода к определению параметров движения, предусматривающего получение информации о местоположении МКС путем обработки фотографий, сделанных при помощи бортовой съемочной аппаратуры фотоспектральной системы (ФСС). Принципиальная возможность создания такой системы возникла сравнительно недавно в связи со значительным прогрессом цифровой фотоаппаратуры в течение последних двух десятилетий и появлением в открытом доступе интегральных фотоснимков поверхности планет в ортогональной проекции (ортофотопланов). Оказалось, что при наличии снимка и ортофотоплана некоторого района возможно с приемлемой для прикладных задач точностью найти точку нахождения фотоаппарата в пространстве в момент съемки.

Если же при обработке серии последовательных снимков поверхности планеты удалось рассчитать координаты достаточно большого числа положений КА в известные моменты фотографирования, это позволяет применить стандартные статистические методы для расчета параметров орбиты.

Отрабатываемая на МКС методика определения положения КА без существенных изменений может использоваться в навигационных целях в ходе экспедиций к Луне и Марсу. Эту принципиальную возможность подтверждает пример расчета радиус-вектора для автоматической станции «Луна-25» по снимку Луны, сделанному с борта указанного КА 17 августа 2023 года.

В статье кратко описана история работ в области автономной навигации для отечественных пилотируемых полетов. Изложен общий подход к определению пространственного положения КА по сделанным с него снимкам поверхности планеты. Результаты применения предложенного алгоритма показаны на примере обработки фотографий Земли, сделанных с борта МКС, и изображения Луны, полученного с автоматической станции «Луна-25».

Автономная навигация в отечественных пилотируемых программах

Автономные методы определения параметров движения КА важны при возникновении трудностей при использовании с этой целью наземных средств. Система автономной навигации (САН) была разработана для пилотируемого облета Луны по проекту Л-1 [3]. САН «Альфа» с БЦВМ создавалась для проекта Л-1 по инициативе ОКБ-1 (ныне РКК «Энергия») и Института прикладной математики Академии наук СССР (ныне ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) для повышения надежности навигации при облете Луны. С этой целью в ОКБ-1 в 1964 году была организована группа Э.В. Гаушуса.

Система автономной навигации предполагала наличие космонавта и состояла из:

- секстанта для измерения углов возвышения звезд над горизонтами Земли и Луны;

- БЦВМ «Салют-1» (оперативная память – 64 32-рядрядные ячейки, постоянная память – 4096 17-рядрядных ячеек; среднее быстродействие – 100 операций/с; масса – 14 кг; размеры – 45×14×14 см);
- часов и навигационного журнала.

В соответствии с алгоритмом навигации параметры орбиты определялись сначала по уравнениям Кеплера, а затем уточнялись с учетом действующих возмущений, в качестве которых принималось сжатие Земли и влияние третьего тела.

Во время полетов автоматических КА «Зонд» №5–8 на специально изготовленном стенде моделировалась работа САН «Альфа» с участием космонавтов, а параллельно с ней – наземного комплекса определения параметров орбиты этих аппаратов. При этом САН «Альфа» не уступала по точности наземному комплексу, а обработка измерений и расчет коррекции орбиты занимали 2 часа.

Для посадки пилотируемого КА на поверхность Луны была построена также САН «Бэта», оборудованная радиовысотомером и оптическим прибором ЛВ-1, с помощью которого фиксировалось прохождение опознанных на поверхности Луны ориентиров через его специальные риски.

После закрытия лунной программы было решено продолжить работу над САН на орбитальных станциях (ОС) «Салют» [3]. Этим занялась группа Э.В. Гаушуса, преобразованная затем в сектор, а позднее – в отдел.¹ В приборный состав САН на ОС «Салют», помимо оборудования САН «Альфа» и «Бэта», входил датчик затмения Солнца ДК-13, с помощью которого фиксировались моменты времени пересечения ОС теневой части орбиты. На ОС «Салют-1» с САН, получившей название «Дельта», активно работал космонавт В.И. Пацаев. На станциях ДОС №123 и «Салют-4» в САН «Дельта», позволяющей определять параметры орбиты ОС и выполнявшей дублирующие функции, использовалась усовершенствованная БЦВМ «Салют-2М». На орбитальном комплексе (ОК) «Мир» разработчиками САН «Дельта» была создана и эксплуатировалась система «Сигма», на которую были возложены некоторые функции по управлению ОК.

Параметры движения КА и ОС традиционно рассчитываются с помощью измерений, выполняемых наземными командно-измерительными пунктами, расположенными на территории нашей страны. В период полета ОК «Мир» впервые для вычисления параметров его движения стали использоваться измерения, получаемые от спутниковых навигационных систем (СНС). СНС, строго говоря, не являются автономными, однако их применение позволяет повысить точность и надежность определения параметров движения КА. На ОК «Мир» аппаратура СНС была впервые установлена вместе с оптическим сканером MOMS для привязки снимков Земли [4]. Спутниковая навигация стала затем активно задействоваться в системах определения и управления движением космических кораблей и ОС [5].

Задача расчета и прогнозирования параметров движения ОС получила дальнейшее развитие на МКС. Один из отработываемых на МКС в рамках КЭ «Вектор-Т» методов предназначен для автономного определения параметров движения КА и основан на применении цифровых снимков Земли.

¹ После ряда преобразований в РКК «Энергия» ко времени запуска на орбиту МКС сотрудники этого отдела вместе с П.А. Боровихиным и Д.Ю. Караваяевым были переведены в отдел, которым руководил М.Ю. Беляев. Отдел занимался планированием, математическим моделированием и обеспечением полета МКС и управлением экспериментами.

Общий подход к решению задачи определения пространственного положения КА по сделанному с него снимку поверхности планеты

Как отмечено в работе [6], оптическое навигационное поле может обладать высокой информативностью и в принципе позволяет достичь высокой предельной точности представления данных о положении КА, при этом важное значение имеет применение оптических приборов с ПЗС-матрицами высокого разрешения и современных вычислительных средств, способных обеспечить нужный уровень обработки.

К оптическим навигационным системам относятся, в частности, те, в которых для определения положения КА относительно планеты (при посадке или орбитальном движении) используются изображения поверхности этой планеты, сделанные с борта КА. По мнению авторов монографии [7], если точность такой навигационной системы будет не хуже, чем у спутниковых навигационных систем, это ознаменует новый этап в развитии автономной навигации КА. В упомянутой работе предлагается один из вариантов решения этой задачи, основанный на автоматическом опознавании наземных ориентиров путем сравнения сделанных с орбиты фотографий Земли с эталонными изображениями. Кроме того, будут необходимы измерения высоты КА над океаном и информация от звездных датчиков.

Для навигации КА представляет интерес и подход, предложенный в [8] для авиации: с помощью фотограмметрии и оптимальной фильтрации данных, стереоскопических методов, а также изображений местности и точечных ориентиров, включая контуры, выполняется высокоточная коррекция навигационных данных летательных аппаратов.

В монографии [9] показано, как с помощью специальных электронных карт и береговых линий в качестве ориентиров осуществить геодезическую координатную привязку сделанных с борта КА снимков земной поверхности. Несмотря на то что задача автономной навигации в [9] не ставится, отмечено, что в дополнение к уже имеющимся параметрам, описывающим положение центра масс и ориентацию КА, можно вычислить поправки, с тем чтобы уточнить параметры геопривязки. Добавим, что как в [8], так и в [9] наряду с полностью автоматической обработкой изображений предусмотрено и участие человека-оператора в этом процессе.

Особенно перспективным применение методов автономной навигации по снимкам планет представляется в полетах к Луне, а в будущем и к Марсу [10–12]. Тестировать методы навигации по снимкам планет целесообразно на ОС. В РКК «Энергия» на протяжении ряда лет создаются и отрабатываются технологии определения пространственного положения КА, также основанные на автоматизированной географической привязке снимков земной поверхности, сделанных с борта МКС.

Для осуществления привязки, кроме собственно цифровой фотографии поверхности планеты, нужно иметь заранее подготовленный ортофотоплан снятого района. Поскольку снимок – это изображение в центральной проекции (все воображаемые лучи, образующие изображение, проходят через точку фокуса), на него распространяется теорема двойных соотношений, следовательно, с помощью четырех выбранных общих (опорных) точек снимок может быть преобразован в проекцию имеющегося ортофотоплана.

Процедура ортотрансформирования заключается в опознании и выборе оператором на обрабатываемом снимке и на эталонном ортофотоплане местности четы-

рех опорных точек, затем с помощью специального алгоритма определяются географические координаты всех точек снимка [13]. При необходимости практическую точность привязки можно оценить, совместив ортотрансформированный снимок с ортофотопланом и определив пространственные расхождения между соответствующими друг другу фрагментами этих двух изображений.

Таким образом, в результате ортотрансформирования каждый пиксель снимка сопоставляется с маленьким участком (точкой) земной поверхности с известными географическими координатами, которые могут быть преобразованы в любую другую систему координат (СК), удобную для дальнейших расчетов. По этой причине легко находится и кратчайшее линейное расстояние между двумя точками земной поверхности, попавшими на снимок. Кроме того, для любой пары пикселей на фотографии можно вычислить величину угла между лучами, направленными на соответствующие точки Земли из точки фокуса оптической системы фотоаппарата.

Нетрудно показать, что на плоскости отрезок OP (рис. 1) всегда будет виден под одним и тем же углом φ из любой точки непрерывной линии, проходящей через O и P и представляющей собой ту часть окружности, которая на рис. 1 расположена выше оси абсцисс и обозначена пунктиром. Радиус и положение центра этой окружности определяются величиной угла, а также длиной и положением отрезка на плоскости [14].

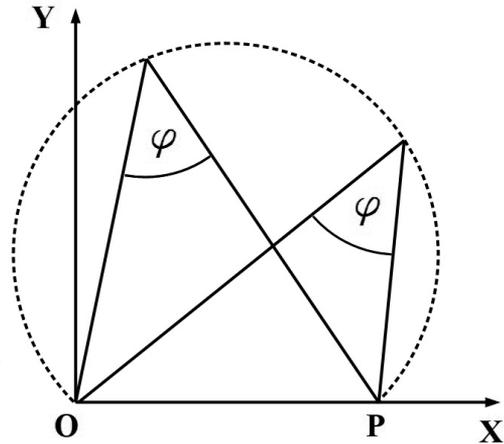


Рис. 1. Возможные точки наблюдения (пунктирная линия), из которых отрезок OP виден под заданным углом

В трехмерном пространстве поверхность, из любой точки которой этот отрезок виден под заданным углом, является закрытым тором, который образуется вращением показанной на рис. 1 окружности вокруг отрезка OP .

Найти точку, из которой производилась съемка, с помощью ортотрансформированного изображения можно несколькими способами. Так, на снимке выбираются три пары далеких друг от друга точек, к каждой из них привязывается свой тор, построенный как указано выше, и свое уравнение расстояния от произвольной точки до поверхности этого тора. Каждое из уравнений приравнивается к нулю и выражается через координаты одной общей СК, например прямоугольной Гринвичской. Тогда при достаточно высокой точности расчета координат выбранных точек и направлений на них точка съемки определяется численными методами как одно из решений системы трех нелинейных уравнений. При этом необходимо исключить те решения, которые не являются истинной точкой съемки (в частности, за счет выбора достаточно близкого к искомой точке начального приближения при вычислениях).

Если каким-либо способом удалось установить положение некоторой плоскости, в которой КА находился в момент фотографирования, то уравнение расстояния от этой плоскости до произвольной точки можно включить в систему, определяющую положение точки съемки, вместе с уравнениями для торов (число которых в этом случае допускается уменьшить до двух).

С этой известной плоскостью можно также связать прямоугольную декартову СК, ось аппликат которой перпендикулярна плоскости. Тогда через координаты этой СК можно вывести два уравнения расстояний от произвольной точки на плоскости до пересечений с этой плоскостью двух торов (построенных по двум парам точек с известными координатами). Таким образом, задача сводится к решению системы двух нелинейных уравнений.

Если отрезки, соединяющие выбранные пары точек, лежат в известной плоскости (или перпендикулярны ей), пересечения соответствующих им торов с этой плоскостью являются окружностями. В этом случае решения соответствующих систем уравнений можно найти с помощью относительно несложных аналитических методов, при использовании которых не возникают потенциальные для численных методов проблемы с поиском начальных приближений и со сходимостью итерационных алгоритмов. Далее приводится пример такого подхода, который регулярно применяется для определения положения МКС, в том числе в рамках КЭ «Вектор-Т».

Важным элементом реализации автономной навигации является задействованная сейчас на МКС программа баллистико-навигационного отображения полетной обстановки, в основе которой лежит система телекоммуникационного контроля и управления «Сигма», разработанная еще для орбитальной станции «Мир» и в свою очередь базирующаяся на системе автономной навигации и управления «Дельта» станции «Салют-7». Эта программа моделирует полет МКС, включая прогноз положения, светотеневую обстановку, вид из иллюминаторов и т.п. При благоприятных обстоятельствах (нет возмущений ионосферы) погрешность моделирования составляет 1-2 с в течение нескольких суток без обновления данных от наземных служб.

Кроме того, программа служит удобной платформой для отработки различных технологий, в том числе автономной навигации, поскольку специально предназначена для научных экспериментов и ее исполняемые модули можно оперативно заменять и дополнять по радиоканалу с Земли.

В настоящее время программа позволяет в реальном времени управлять различной научной аппаратурой, включая поворотные платформы системы ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА) [15] и ультразвуковую систему координатной привязки фотоизображений.

Использование специально выбранной плоскости при навигационной обработке снимка

Как отмечено выше, в результате процедуры ортотрансформирования становится возможным определить географические координаты всех точек на снимке. Если точность географической привязки достаточно высока, то для определения положения точки съемки подойдут любые фрагменты снимка. Рассмотрим, как это можно использовать при выборе специальной рабочей плоскости, с тем чтобы свести трехмерную задачу к двумерной.

На исходном, еще не ортотрансформированном изображении отмечаются пиксели, образующие вписанную в него окружность, центр которой совпадает с центром снимка. Радиус такой окружности равен половине меньшей стороны прямоугольного кадра. Если съемка производилась с отклонением от надира и видимые границы планеты не попали на фотографию, на привязанном ортотрансформированном

снимке окружность преобразуется в вытянутую замкнутую кривую, соответствующую пересечению конуса (с центром в фокусе оптической системы) с фигурой планеты. Кривая напоминает по форме эллипс, однако им не является [16], при этом ограниченная ею фигура всегда вытянута в направлении наибольшего наклона поверхности планеты относительно центральной оси съемки (перпендикулярной плоскости светочувствительной матрицы фотоаппарата) и помогает выбрать специальную рабочую плоскость следующим образом.

Ось, вдоль которой вытянута фигура, ограниченная этой кривой, указывает направление наклона земной поверхности по отношению к центральной оси съемки и может быть использована для определения плоскости, где будут производиться дальнейшие вычисления. На ортотрансформированном снимке выделяются пиксели, совпадающие с центром исходного изображения и вписанной в него окружностью, а также с имеющимися на нем малыми участками (точками) поверхности планеты с известными координатами. Это позволяет рассчитать расстояния от точки, соотносимой с центром снимка (обозначим ее B), до всех точек, соответствующих окружности. Если сообразная окружности кривая вытянута, можно найти на ней точку (назовем ее A), наиболее удаленную от B . Тогда с диаметрально противоположной стороны от A можно выбрать точку C , расстояние до которой от центральной точки B максимально по сравнению с соседними точками кривой.

В качестве рабочей выбирается плоскость, в которой лежат точки A , B и C . В ней же в момент фотографирования должна находиться и точка съемки S (фокус объектива). В случае если поверхность планеты имеет форму сферы, эта плоскость проходит через центр планеты и совпадает с плоскостью главного вертикала снимка, задаваемой S , B и точкой на поверхности планеты, являющейся надиром по отношению к S .

На рис. 2, плоскость которого совпадает с выбранной рабочей, показана схема определения положения точки съемки S . Из нее отрезки AB и BC видны под одним и тем же углом, т.е. углы ASB и BSC имеют аналогичную известную величину α , обусловленную геометрическими характеристиками фотоаппаратуры и равную половине углового размера узкой стороны фотокадра, поскольку именно в этот кадр перед ортотрансформированием вписывалась окружность. Известны также координаты выбранных на поверхности планеты точек A , B и C . Штриховой и пунктирной линиями показаны фрагменты окружностей, с которых отрезки AB и BC видны под углом α . Вместо одной из них могла быть выбрана и окружность, построенная на отрезке AC , который наблюдается под углом величиной 2α .

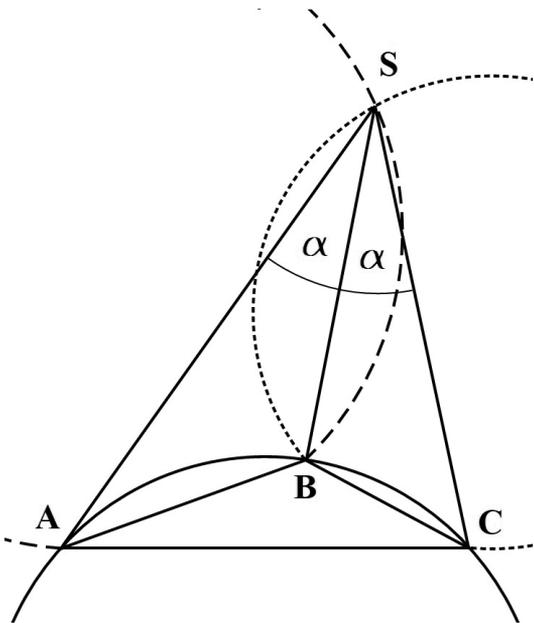


Рис. 2. Геометрическая схема определения положения точки S по известным положениям точек A , B и C

Представленные на рис. 2 две окружности в реальных геометрических условиях съемки поверхности планеты с ор-

битального КА будут иметь две точки пересечения, одна из которых совпадет с B (что можно использовать для проверки точности результатов), а другая – с S . Таким образом, положение точки съемки несложно вычислить.

Приведенная на рис. 2 геометрическая схема не предполагает обязательного привлечения уравнений окружностей, построенных на заданных отрезках. Ранее была получена следующая формула [17] для угла BCS (обозначим его γ):

$$\operatorname{tg}(\gamma) = \frac{\sin(\tau)\cos(2\alpha) - \cos(\tau)\sin(2\alpha)}{\cos(\tau)\cos(2\alpha) + \sin(\tau)\sin(2\alpha) + BC / AB},$$

где τ – известная величина угла ABC .

Поскольку с учетом этой формулы известны все углы треугольника BCS , по известным положениям B и C вычисляется и положение S .

Тем не менее в отличие от этого решения подход, предполагающий применение специально построенных окружностей, более универсален даже в двумерном случае – например, позволяет выбирать отрезки, не имеющие общей точки и видимые из точки съемки под разными углами. Это возможно, если удалось опознать объекты с известными координатами, лежащие в рабочей плоскости, но не совпадающие с точками A , B и C . В таких случаях алгоритм решения с помощью окружностей существенно не меняется по сравнению с подходом на рис. 2.

Некоторые методы обработки фотографий, основанные на построении специальных окружностей, одновременно определяют два возможных положения точки съемки в рабочей плоскости. Тогда необходимы дополнительные методы для выбора того положения, которое соответствует реальной точке съемки [17].

Определение положения и орбиты МКС по сделанным с ее борта снимкам Земли

Как уже сообщалось выше, одной из целей КЭ «Вектор-Т» является проверка технологии определения положений и орбиты МКС путем обработки снимков земной поверхности, сделанных с российского сегмента станции. Для выполнения этой задачи, включая поиск «узких» мест, влияющих на точность результатов, задавалась автоматическая (как правило, один раз в минуту) съемка земной поверхности фотоаппаратом, жестко закрепленным (с помощью аппаратуры ФСС [15]) на иллюминаторе внутри обитаемого пространства МКС.

В настоящее время в рамках эксперимента «Вектор-Т» отрабатывается технология, о которой шла речь в предыдущем разделе. Одна из ее особенностей состоит в том, что точность результатов существенно снижается при съемках с борта КА точек подстилающей поверхности, близких к надиру, поэтому фотоаппарат закреплялся на иллюминаторе так, чтобы угол между направлением съемки и направлением в наadir был не менее 30° . При этом оптическая ось объектива фотоаппарата отклонялась от трассы полета МКС влево или вправо в зависимости от баллистического прогноза так, чтобы было сделано как можно больше снимков освещенной Солнцем местности, потенциально пригодной для опознавания.

На рис. 3 представлено одно из изображений (с условным идентификатором $54R0300$), полученных в ходе сеанса съемок 28 июня 2023 года. На первом этапе обработки в него была вписана окружность в соответствии с предлагаемой методикой.

С помощью специального программного обеспечения специалист наземной службы опознал местность на снимке и сопоставил четыре точки на исходной фотографии с соответствующими точками на ортофотоплане земной поверхности. Дальнейшие действия производились в полностью автоматическом режиме. При пересчете географических координат в декартовы учитывалось сжатие Земли согласно геодезической системе WGS 84.

Исходный снимок был преобразован в ортографическую проекцию и совмещен с ортофотопланом, как показано на рис. 4. Вытянутая замкнутая белая линия соответствует окружности, которая перед ортотрансформированием была вписана в исходное изображение, представленное на рис. 3. Белым отрезком отмечено пересечение с поверхностью Земли плоскости, близкой к плоскости главного вертикала снимка. На этом отрезке отмечены точки, выбранные таким же образом, как и точки *A*, *B* и *C* в предыдущем разделе. На рис. 4 они обозначены соответственно как @_54R0300_A, @_54R0300_B и @_54R0300_C.



Рис. 3. Снимок 54R0300, сделанный с борта МКС 28 июня 2023 года в 16:20:00 UTC (всемирное координированное время), со вписанной окружностью

Красными крестиками отмечены те же три точки на менее подробной карте местности (рис. 5), желтой линией – трасса полета МКС, то есть проекция априорно известной ее орбиты, служившей эталоном при оценке точности расчетов. Красным кружком на трассе обозначено эталонное положение (подспутниковая точка) МКС в момент выполнения снимка 54R0300. Рассчитанная с использованием этого снимка подспутниковая точка МКС помечена на трассе красным крестиком @_54R0300_M, частично закрытым красным кружком.

В данном случае расхождение между рассчитанной и эталонной подспутниковыми точками составило 3 км. Несовпадения между подспутниковыми точками, выявленные в результате обработки других 28 снимков, сделанных 28 и 30 июня 2023 года, оказались примерно такими же и не превысили 2,9-3,2 км. Значительнее

оказалась разница между рассчитанным и эталонным положениями МКС по высоте: для снимка 54R0300 она составила около 6 км, а для всех 29 снимков – порядка 4 км. Таким образом, по прямой дальность разошлась в среднем примерно на 5 км.

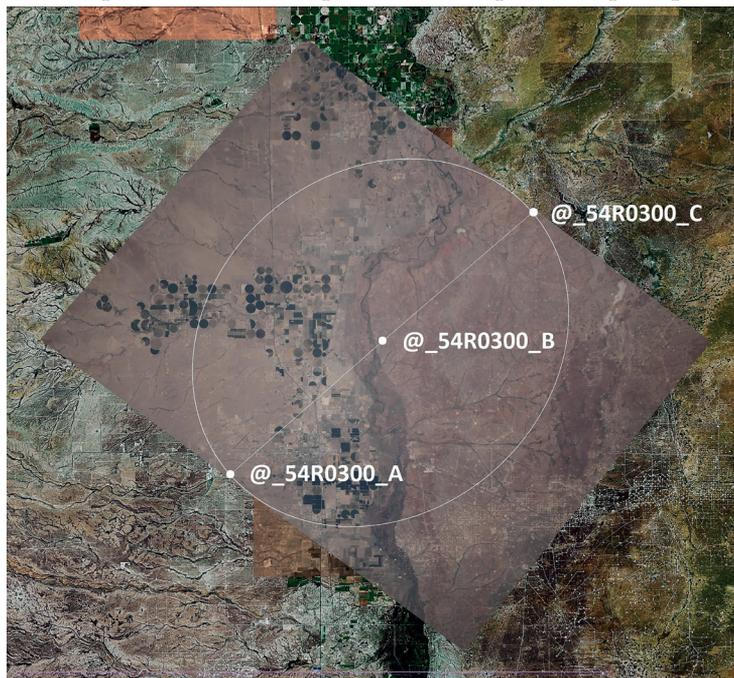


Рис. 4. Ортотрансформированный снимок 54R0300, совмещенный с ортофотопланом и размеченный для дальнейшей обработки

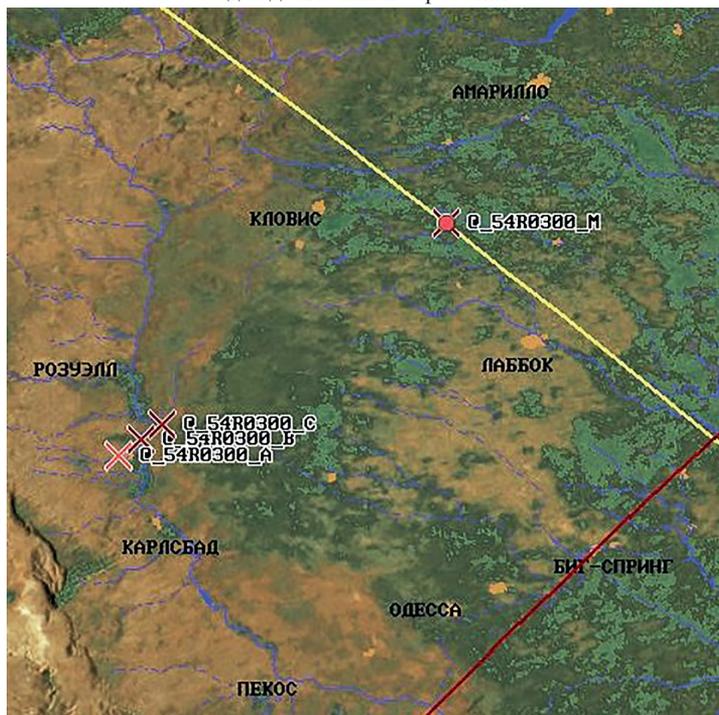


Рис. 5. Сравнение эталонного положения МКС (отмечено красным кружком) с рассчитанным по ортотрансформированному снимку 54R0300

Положение МКС рассчитывалось с помощью методов, рассмотренных в предыдущем разделе, с учетом атмосферной рефракции и высот выбранных районов земной поверхности над уровнем моря. Угол, под которым видны отрезки, образованные выбранными на рис. 4 точками, вычислялся исходя из геометрических размеров светочувствительной матрицы фотоаппарата Nikon D5 и фокусного расстояния (400 мм) его объектива. Для дополнительной проверки результатов использовались альтернативные методы расчета, включая численные. Более точное окончательное решение было получено за счет описанного ниже приема.

В ходе эксперимента «Вектор-Т» выяснилось, что помимо объективных сложностей, возникающих в таких характерных для съемок Земли условиях, как облачность, большие океанские поверхности, сложный горный рельеф, рефракция и т.п., существенное влияние на точность оказывает и погрешность установки, вызванная тем, что оптическая ось объектива не проходит через центральный пиксель снимка (светочувствительной матрицы). Ввиду этого, если задать (в пикселях) некоторые отклонения оптической оси от центра снимка, можно найти такой вариант, при котором, например, два вычисленных угла, образованных оптической осью и направлениями из точки фокуса на две разные точки окружности, наиболее близки друг к другу и к заданному значению. Такой критерий оказался удачным, видимо, потому, что обычно оптика обрабатывается на станках в процессе вращения заготовки и отклонения от идеальных окружностей пренебрежимо малы, а значит, в реальности практически совпадают все углы между оптической осью и лучами, проходящими через края линз.

Результаты, полученные с помощью данной технологии, могут быть улучшены путем калибровки параметров аппаратуры. В частности, значительное влияние на точность расчета положения точки съемки оказывает то, насколько реальное фокусное расстояние оптической системы совпадает с номинальным. Например, в условиях съемок ошибка на 1 мм в фокусном расстоянии объектива привела бы к погрешности определения высоты МКС примерно в 1 км. И разумеется, основополагающее значение имеет разрешение снимков, а также масштаб и точность ортофотоплана, применяемого при их географической привязке.

Особенность описываемых методов заключается в том, что для расчета положения точки съемки по снимку, сделанному с борта КА, не требуется знать момент времени, когда производилась съемка. Если известна орбита КА, рассчитанное положение точки съемки позволяет установить и время, поскольку можно определить, когда КА находился вблизи этой точки. На практике удавалось неоднократно восстанавливать правильное время съемок с борта МКС, когда при послеполетной обработке различных снимков обнаруживалось, что показания встроенных часов фотоаппаратов были неверны. В некоторых случаях наземные специалисты могли достаточно оперативно выявить по полученным фотографиям систематическую погрешность отчета времени, чтобы учесть или устранить ее при планировании ближайшего сеанса дистанционного зондирования Земли с борта МКС. Для решения таких задач точности, достигнутой в эксперименте «Вектор-Т», вполне достаточно.

При вычислении параметров орбиты КА в целях прогноза его движения требуется точная привязка фотографий ко времени съемки. Правда, применение классических аналитических методов определения орбиты по нескольким положениям КА нецелесообразно, если точность измерений невысока. Тем не менее при наличии достаточно большого числа снимков можно рассчитать ряд последовательных зна-

чений радиус-вектора МКС для известных моментов времени, а затем с помощью статистических методов определить и орбиту станции.

Большинство фотографий Земли, получаемых посредством автоматической съемки фотоаппаратом, закрепленным на иллюминаторе, не пригодны для опознавания и географической привязки, так как на них фиксируется, например, сплошная облачность либо поверхность океана без островов или пустыня.

Так, самая большая последовательность опознанных и ортотрансформированных снимков, которую удалось получить в одном сеансе автоматической съемки, насчитывает лишь 30 изображений, притом что всего было сделано 172 фотографии [14]. В результате обработки этих 30 снимков были вычислены значения радиус-векторов точек съемки, позволившие вывести сглаживающее решение уравнений движения МКС, при котором положения восходящих узлов в интервале обработки отличались от положений восходящих узлов эталонной (точно определенной другими способами) орбиты МКС менее чем на 1 км. При этом в некоторых случаях невязки (отклонения вычисленных положений точек съемки от эталонных решений) были больше, что объясняется неточностью отсчета времени в съемочной аппаратуре, приведшей к систематической погрешности априорно неизвестной величины. Для ее уменьшения была проведена (без использования данных об эталонной орбите) специальная коррекция времени привязки снимков: погрешность определения момента съемки вводилась в систему используемых уравнений в качестве искомого параметра. Это позволяло повысить точность расчета орбиты МКС. Следует также отметить, что точность данного метода зависит и от качества используемых цифровых моделей поверхности планеты. В описываемых примерах при обработке снимков применялись общедоступные модели, не отличающиеся высокой детализацией.

Точность определения орбит можно повысить за счет аналогичной коррекции других величин (например, отклонений параметров съемочной аппаратуры от номинальных значений) путем введения их в систему уравнений в качестве неизвестных параметров, а также за счет увеличения числа снимков, по которым вычисляется положение МКС. Доля пригодных к распознаванию изображений может возрасти, если целенаправленно выбирать для съемки районы с высокой вероятностью идентификации и низкой облачностью, что требует участия экипажа либо разработки для управления съемкой специального программного обеспечения, способного различать образы. Если априорно известны приближенные значения параметров орбиты КА, для их уточнения можно исходя из неточного знания орбиты планировать съемку районов с ожидаемой низкой степенью облачности, которая оценивается по статистическим данным или с использованием метеорологического прогноза.

В случае съемок лишенной акваторий и облачности Луны, на поверхности которой имеется много удобных для опознавания районов и огромное число ориентиров в виде кратеров, можно рассчитывать, что число изображений, непригодных для навигационной обработки, будет невелико даже при автоматической съемке фотокамерой, жестко зафиксированной на борту КА. Следует также отметить, что при расчете окололунных орбит не требуется учитывать атмосферную рефракцию и определять коэффициент торможения в атмосфере. В связи с этим предлагаемая методика при полетах к Луне может быть полностью автоматизирована. Это подтверждает и значительное число публикаций, посвященных разработке в навигационных целях систем идентификации таких доминирующих на лунной поверхности структур, как кратеры [18, 19].

Оценка положения автоматической станции «Луна-25» по сделанному с ее борта снимку Луны

В числе различных навигационных систем, предлагаемых для перспективных лунных экспедиций, рассматриваются и средства визуальной навигации. Один из примеров такого подхода – автономная оптическая навигация по горизонту Луны и по контрольным точкам на ее поверхности с использованием специальной широкоугольной съемочной аппаратуры [20].

Не подлежит сомнению, что в ходе пилотируемых полетов съемки лунной поверхности в различных целях будут производиться экипажем посредством портативных фотоаппаратов через иллюминаторы, а также, возможно, управляемых камер на внешней поверхности КА [21]. Описанная выше методика при наличии даже неспециализированного бортового компьютера (например, ноутбука) может применяться в навигационных целях и при съемках такого рода, а не только в специально проектируемых системах оптической навигации.

Чтобы проверить принципиальную возможность определить положение КА относительно Луны по снимкам ее поверхности, сделанным ручной камерой через иллюминатор, ранее были выполнены расчеты на основе доступных в интернете фотографий, полученных в ходе реализации американской пилотируемой программы «Аполлон» [17, 22]. Несмотря на невысокое качество этих оцифрованных изображений, их удалось ортотрансформировать и использовать для приближенного вычисления радиус-векторов КА в моменты съемок.

В августе 2023 года была опубликована [23] фотография (рис. 6), сделанная служебной телевизионной системой СТС-Л с борта КА «Луна-25» во время его движения по орбите искусственного спутника Луны. Изображение было получено с помощью посадочной камеры КАМ-С, технические характеристики которой приведены в [24]. Разрешение снимка ограничено в первую очередь небольшим фокусным расстоянием (12,3 мм) оптической системы камеры. Тем не менее фотография была задействована для тестирования методики, обрабатываемой в ходе КЭ «Вектор-Т».

Для селенографической привязки снимка использовался ортофотоплан Луны в проекции Меркатора, взятый из [25]. Изображение было преобразовано в ортогональную проекцию и совмещено с ортофопланом (рис. 7). Общими (опорными) точками послужили центры нескольких мелких лунных кратеров. Заметно, что по разрешению ортофотоплан уступает снимку, так что на высокую точность привязки рассчитывать не приходится. Это подтверждается тем, что, как видно на рис. 7, те точки полученной из вписанной в исходный снимок окружности линии, которые наиболее удалены от центра, не являются диаметрально противоположными друг другу.

Предварительная обработка снимка в данном случае дала следующие результаты:

- отклонение оптической оси от надира – $19,87^\circ$;
- наклонная дальность до центра снимка – 96,9 км;
- высота над поверхностью Луны – 91,5 км.

Этому отвечают два возможных положения точки съемки в плоскости, близкой к плоскости главного вертикала снимка, со следующими подспутниковыми точками в селенографической системе координат:

долгота $-138,65^\circ$, широта $-75,67^\circ$;
долгота $-139,36^\circ$, широта $-77,73^\circ$.



Рис. 6. Снимок Луны, сделанный с борта КА «Луна-25» 17 августа 2023 г. в 05:22:56 UTC

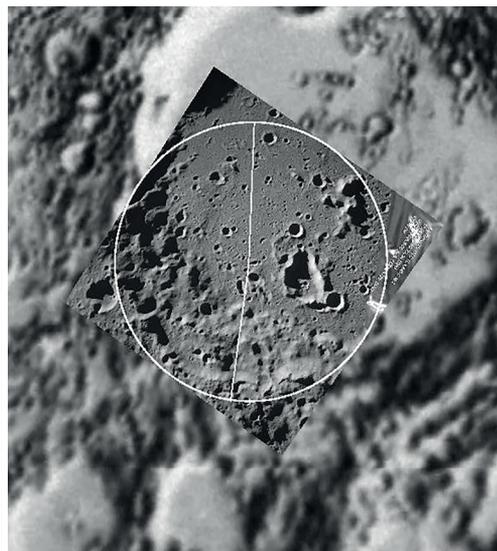


Рис. 7. Совмещенный с ортофотопланом ортотрансформированный снимок и разметка, полученная при его автоматической обработке

С помощью методов, обрабатываемых в КЭ «Вектор-Т» (согласно схеме на рис. 2), из этих вариантов был выбран второй. Соответствующие координаты в декартовой луноцентрической селеноэкваториальной системе:

$$x - 295,52 \text{ км}, y - 253,68 \text{ км}, z - 1785,56 \text{ км}.$$

Их преобразование в луноцентрическую геоэкваториальную систему координат J2000 [26, 27] дает:

$$X - 354,44 \text{ км}, Y - 584,07 \text{ км}, Z - 1695,03 \text{ км}.$$

Таким образом, благодаря отработанным в КЭ на МКС методам удалось получить результат и при обработке фотографии, сделанной с борта «Луны-25». Однако его следует считать лишь приблизительной оценкой из-за относительно низкого разрешения изображений и привлечения общедоступной цифровой модели Луны, не обладающей высокой точностью [25].

Заключение

Методы автономной навигации в пилотируемых программах начали развиваться в 60-е годы в связи с планируемыми полетами к Луне [3]. В дальнейшем они активно отработывались на отечественных орбитальных станциях. В связи с обсуждаемыми в настоящее время полетами к Луне и Марсу, а также уязвимостью спутниковых систем навигации в околоземном пространстве необходимо развивать методы автономного определения параметров движения КА. Описанные в настоящей статье навигационные методы на основе снимков планеты реализованы в виде как наземного, так и бортового программного обеспечения. Оно отработывалось как на математических моделях движения КА вокруг планеты, так и в ходе КЭ «Вектор-Т», а также некоторых других научных экспериментов, связанных с наблюдением поверхности Земли с борта МКС. В отдельных случаях предложенные алгоритмы использовались для оценки положения КА по сделанным с его борта снимкам поверхности Луны.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что даже рассчитанные по одиночным снимкам (в том числе сделанным не в навигационных целях) координаты КА в момент фотографирования дают возможность уточнить уже известные параметры орбиты (траектории) КА, например чтобы рассчитать корректирующие импульсы при полетах к Луне или ввести поправку в расписание периодов наблюдения наземных объектов в целях научных экспериментов на борту орбитальной станции.

В том случае, если сделано достаточное число последовательных снимков поверхности планеты, появляется возможность применить хорошо изученные статистические методы обработки результатов измерений для определения орбиты КА, что было подтверждено в ходе эксперимента «Вектор-Т».

Предложенная технология может быть задействована для создания автономной системы навигации, например в качестве резервной, аварийной или контролирующей, в добавление к используемым сейчас навигационным системам. Построение на ее основе автономной системы навигации для полетов автоматических аппаратов и пилотируемых КА к Луне, а впоследствии и к Марсу потребует дополнительных исследовательских, расчетных и конструкторских работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №1(116). С. 3–11. DOI 10.17285/0869-7035.0084.
2. Гаушус Э.В., Зыбин Ю.Н., Легостаев В.П. Автономная навигация и управление орбитальной станцией «Салют-7» // Космические исследования. 1986. Т. 24, вып. 6. С. 844–864.
3. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва. Москва: РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 1996. 671 с.
4. Belyaev, M.Yu., Rulev, D.N., Matveeva, T.V., Sazonov, V.V., Foeckersperger, S., Frank, H., Paeffgen, W., Experience of investigations performed with the help of navigation system aboard the research Priroda module on the Mir Space station, *9th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems*, 2002, Russia, St. Petersburg, pp. 105–110.
5. Микрин Е.А., Михайлов М.В. Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 358 с.
6. Почукаев В.Н. Основные концептуальные положения баллистико-навигационного обеспечения полетов автоматических космических аппаратов. М.: Машиностроение-Полет, 2018. 156 с.
7. Аншаков Г.П., Голяков А.Д., Петрищев В.Ф., Фурсов В.А. Автономная навигация космических аппаратов. Самара: Государственный научно-производственный ракетно-космич. центр ЦСКБ-Прогресс, 2011. 486 с.
8. Белоглазов И.Н., Казарин С.Н., Косьянчук В.В. Обработка информации в иконических системах навигации, наведения и дистанционного зондирования местности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 368 с.
9. Антошуккина С.В., Гуров В.С., Егошкин Н.А. и др. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.
10. Brouk, J.D., DeMars, K.J., Kalman Filtering with Uncertain and Asynchronous Measurements Epochs, *Navigation Journal of the Institute of Navigation*, 2024, vol. 71, issue 3, doi: 10.33012/navi.652.
11. Wang, Ar., Wang, L., Zhang, Yn., Hua, Bc., Li, T., Liu, Y., Lin, Dy., Landing site positioning and descent trajectory reconstruction of Tianwen-1 on Mars, *Astrodynamics*, 2022, vol. 6, issue 1, pp. 69–79, doi: 10.1007/s42064-021-0121-1.
12. Chen, D., Hu, F., Zhang, Lq., Wu, Yz., Du, Jl., Peethambaran, J., Impact crater recognition methods: A review, *Science China-Earth Sciences*, 2024, vol. 67, issue 6, pp. 1719–1742, doi: 10.1007/s11430-023-1284-9.
13. Падалка Г.И., Ревин С.Н., Десинов Л.В. и др. Результаты мониторинга с борта РС МКС катастрофических наводнений Краснодарского края // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 4 (9). С. 42–59.

14. **Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваяев Д.Ю., Сазонов В.В.** Метод определения орбиты Международной космической станции по выполненным с нее снимкам поверхности Земли // Труды LIV чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2020. С. 5–16.
15. **Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Есаков А.М., Караваяев Д.Ю., Рассказов И.В.** Оптимизация наведения научной аппаратуры на наблюдаемые объекты в эксперименте «Ураган» на МКС // Гироскопия и навигация. 2023. Том 31. № 4(123). С. 118–137.
16. **Бурдаев М.Н.** О форме границ и размерах зон обзора поверхностей планет с космических аппаратов // Пилотируемые полеты в космос. 2014. №3(12). С. 71–75.
17. **Микрин Е.А., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваяев Д.Ю.** Определение орбиты по выполняемым космонавтами снимкам поверхности Земли и Луны // Космическая техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 88–99.
18. **Maass, B., Woicke, S., Oliveira, W.M., et al.,** Crater Navigation System for Autonomous Precision Landing on the Moon, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, vol. 43, no. 8, pp. 1414–1431, doi: <https://doi.org/10.2514/1.G004850>.
19. **Бобков А.В., Сюй Ян.** Определение собственного положения лунного посадочного модуля по видеоизображению с использованием метода сигнатур // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. Вып. 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2278>.
20. **Жуков Б.С., Полянский И.В., Жуков С.Б.** Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну с помощью сверхширокоугольной камеры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. №2. С. 24–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.
21. **Жуков В.М.** Анализ условий, особенностей и способов выполнения операций визуально-инструментального наблюдения и фотосъемки на Луне // Пилотируемые полеты в космос. 2021. №2(39). С. 111–131. DOI 10.34131/MSF.21.2.111-131.
22. **Микрин Е.А., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваяев Д.Ю.** Отработка на МКС технологии автономной навигации с помощью съемок экипажа для задачи облета Луны // Сборник материалов юбилейной XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 7–13.
23. **Институт космических исследований РАН** [Электронный ресурс]: информ.-справочный портал. URL: <https://iki.cosmos.ru/research/missions/luna-25>.
24. **Аванесов Г.А., Бережков А.В., Бессонов Р.В. и др.** Служебная телевизионная система КА «Луна-25» // Астрономический вестник. 2021. Т. 55. №6. С. 601–617.
25. **Google Moon** [Электронный ресурс]: информ.-справочный портал. URL: <https://www.google.ru/moon/>.
26. **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. IV-22 Ракетно-космическая техника: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. академика РАН В.П. Легостаева; главн. ред. академик РАН К.В. Фролов. М.: Машиностроение, 2012. 925 с.
27. **Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В. и др.** Баллистико-навигационное обеспечение полетов автоматических космических аппаратов к телам Солнечной системы / под ред. д.ф.-м.н. А.Г. Тучина. Химки: АО «НПО Лавочкина», 2018. 336 с.

Belyaev, M.Yu. (S.P.Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev; Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Moscow region, Mytischki), **Borovikhin, P.A., Karavaev, D.Yu.** (S.P.Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Moscow region, Korolev)
Methods of Autonomous Navigation in Manned Space Missions and Testing the Technique of Orbit Parameters Determination by Images of the Earth in the Vector-T Experiment on ISS, *Гироскопия и Навигация*, 2024, vol. 32, no. 4 (127), pp. 88–104.

Abstract. Development of autonomous navigation methods is particularly related to the moon expeditions planned in the 60-ies of the last century. Later these methods were tested on board orbital stations Salyut, Mir and the International Space Station (ISS) within the Vector-T experiment. The article considers one of the lines of this experiment – determination and correction of the ISS position by the images of the Earth surface taken by onboard photo-spectral system. The authors provide an example of using the technique tested during the Vector-T experiment to determine the automatic station Luna-255 position by the moon image taken from it.

Key words: International Space Station, space experiment Vector-T, orbit determination, autonomous navigation, space images, Luna-25.

Материал поступил 21.09.2024