

УДК 629.7

На правах рукописи

Боровихин Павел Александрович

**МЕТОДЫ
СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
НАВЕДЕНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ,
НАВИГАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2022

Диссертация выполнена в ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (г. Королёв).

Научный руководитель: **Беляев Михаил Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Почукаев Владимир Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник АО
«Центральный научно-исследовательский
институт машиностроения» («ЦНИИмаш»)

Ельников Роман Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры 601 «Космические системы
и ракетостроение» ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)» (МАИ)

Ведущая организация: ФГБУН Институт космических
исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 14-30
на заседании диссертационного совета 24.2.331.08 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального
машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, аудитория 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГТУ им.
Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью
учреждения, просим присылать по адресу: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская
улица, дом 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.331.08.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.08,
к.т.н, доцент

А.Ю. Луценко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При управлении полетами космических аппаратов (КА) выполняется наведение научной аппаратуры (НА) на исследуемые объекты (астрономические, расположенные на поверхности Земли и др.). Если НА жестко установлена на корпусе КА, то наведение НА на объекты осуществляется путем разворота КА. В случае если КА снабжен подвижными платформами наведения (ППН) с установленной на них НА, наведение осуществляется с помощью разворотов ППН. Планирование и выполнение наведения НА включает в себя решение нескольких задач.

При проведении наблюдений в процессе полета КА необходимо обеспечить требуемую точность и надежность наведения. Это достигается точным и надежным определением положения КА относительно исследуемых объектов, для чего может потребоваться разработка новых дополнительных методов навигации КА, в том числе автономной, которая особенно важна для дальних космических экспедиций, например, к Луне.

На основании навигационных данных, полученных с помощью измерений, рассчитываются углы поворота КА или ППН, позволяющие направить оси чувствительности (визирования) НА на исследуемые объекты. Если положения объектов известны недостаточно точно, необходимы методы, позволяющие повысить вероятность успешного наведения НА.

Поскольку каталоги изучаемых объектов обычно содержат большое их количество, при управлении полетом КА требуется найти оптимальную программу наведения на объекты по выбранным критериям, с учетом баллистических и ресурсных ограничений. В качестве критериев могут выступать, например, сумма углов разворотов КА (ППН), требующая минимизации, оценка ожидаемой эффективности исследований, требующая максимизации, и другие.

Успешное наведение НА КА на наблюдаемые объекты обеспечивается совместным решением перечисленных задач в процессе полета КА.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и внедрение наземных и бортовых средств наведения НА в ходе управления полетом, позволяющих оптимизировать программы выполнения наблюдений с борта КА.

Целью работы является повышение эффективности наблюдений исследуемых объектов с борта КА, достигаемое специальными методами наведения НА. Под эффективностью понимается информативность – количественная оценка объема полезной научной информации, получаемой при проведении экспериментов.

Задачи исследований. Для достижения указанной цели было необходимо решить ряд задач, в частности:

- выбрать критерии оптимальности для наблюдений изучаемых объектов и использовать их в алгоритмах наведения НА на объекты;
- разработать методы оптимального наведения одновременно нескольких комплектов НА на отдельные заданные объекты и на группы объектов;
- разработать методы, позволяющие определять и уточнять положение КА в пространстве и его орбиту;

- использовать предложенные методы в специальном программно-математическом обеспечении (ПМО) экспериментов на борту Международной космической станции (МКС).

Объектом исследований являются методы управления полетом КА, связанные с обеспечением наблюдений изучаемых объектов.

Предметом исследований является разработка новых методов, обеспечивающих надежное и оптимальное наведение НА для наблюдения исследуемых объектов с борта КА, и их реализация в виде наземного и бортового ПМО Российского сегмента (РС) МКС.

Методы исследований:

1) моделирование условий наблюдения объектов с помощью баллистических моделей движения КА и математических моделей наведения аппаратуры, установленной на КА;

2) методы оптимизации (как точные, например, применяемые в линейном программировании, так и приближенные, основанные на эвристических алгоритмах) наведения НА согласно заданным критериям и ограничениям;

3) теоретико-вероятностные методы учета погрешностей исходных данных, позволяющие снизить вероятность ошибок наведения;

4) методы фотограмметрии и обработки изображений для планетографической привязки снимков, сделанных с борта КА, и определения по ним положения и орбиты КА.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием корректных математических моделей, методов, эвристических решений, полученных на основе экспериментальных данных, а также разработкой для прикладных задач нескольких альтернативных решений, позволяющих выполнить взаимную проверку результатов. Достоверность результатов также подтверждается успешной практикой применения ПМО, разработанного с участием автора диссертации, при наведении НА МКС на изучаемые объекты и обработке изображений земной поверхности для определения орбит.

Научная новизна работы:

1) разработаны методы наведения НА на исследуемые объекты, позволяющие оптимизировать программы наблюдений, в том числе с использованием нескольких отдельно наводимых комплектов НА;

2) в качестве новых критериев оптимального наведения НА используются ожидаемые пространственное разрешение снимков и вероятность успешного наведения на наблюдаемые объекты;

3) для повышения вероятности успешного наведения НА на объекты в условиях неопределенности данных об их положении используется искусственное рассеивание направления съемки (применяемые способы запатентованы);

4) для коррекции ошибок, вызываемых неточностью текущих баллистических данных, предложены защищенные патентами РФ способы определения орбиты КА с использованием сделанных с его борта снимков поверхности планеты;

5) предложенные методы впервые реализованы на борту РС МКС при

выполнении наблюдений исследуемых объектов.

Практическая значимость результатов. Предлагаемые средства позволяют:

1) специалистам по управлению КА и экипажам ОС оптимизировать, по заданным критериям, наблюдения заданных групп изучаемых объектов при совместном использовании нескольких комплектов наводимой НА;

2) при выполнении съемок объектов в условиях неопределенности исходных данных повысить надежность наведения НА за счет использования методов искусственного рассеивания;

3) решать задачи навигации по снимкам поверхности планеты с борта КА, в том числе в дальних экспедициях, например, к Луне.

Реализация и внедрение научных и практических результатов работы. В «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» внедрены:

1) наземное и бортовое ПМО подготовки и выполнения экспериментов («Ураган» и др.) с учетом как прогнозируемых баллистических условий, так и приоритетности наблюдаемых объектов согласно нескольким критериям;

2) наземное и бортовое ПМО подготовки и выполнения наведения НА на наземные объекты в условиях неопределенности исходных данных;

3) автоматизированное рабочее место для определения координат КА по сделанным с него снимкам поверхности Земли и возможностью решения задач навигации с использованием фотографий Луны в лунной программе;

4) комплекс ПМО для подготовки «двухстрочных элементов» орбиты и наглядного отображения баллистического прогноза по ним, который применяется при подготовке и проведении экспериментов на МКС.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) методы оптимального наведения НА на исследуемые объекты по предложенным в работе критериям и при заданных ограничениях, в том числе с одновременным использованием нескольких комплектов НА;

2) методы наведения НА в условиях неопределенности исходных данных с применением искусственного рассеивания направления съемки;

3) методы, позволяющие определить орбиту КА и поправку к текущим баллистическим данным по снимкам планеты, сделанным с борта КА;

4) практическая реализация разработанных методов при управлении полетом МКС.

Соответствие паспорту специальности. Тема работы – навигация и управление полетом летательных аппаратов, в основном КА различных классов, в целях оптимального наведения бортовой НА на внешние объекты – соответствует паспорту специальности «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» по пунктам 1 («Расчет траекторий движения ЛА и орбит космических аппаратов (КА) по заранее известным данным»), 3 («Динамическое проектирование управляемых летательных аппаратов и исследование динамики их движения») и 4 («Навигация и оперативное управление полетом»).

Личный вклад автора. Соискатель самостоятельно поставил задачу повышения вероятности успешной съемки объектов и предложил решения как

этой задачи, так и задач навигации по снимкам планеты, повышения информативности наблюдений и выбора ее дополнительных критериев. Автором разработано ПМО для наземной обработки предложенных им алгоритмов и подготовлены рекомендации по их внедрению на борту РС МКС, а также реализована значительная часть бортового ПМО по теме работы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на XXIV и XXV конференциях по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 2017, 2018; XLVI, XLVII, XLVIII, LI, LII, LIII, LIV, LV научных чтениях К.Э. Циолковского, Калуга, 2011–2013, 2016–2020; XLI Академических Королёвских чтениях по космонавтике, Москва, 2017; XIV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления, Геленджик, 2021.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы 37 работ, из них 4 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [1, 6, 7, 19], 15 патентов РФ на изобретение и 18 научных статей в трудах конференций. Общий объем 12,6 п.л./4,1 п.л.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 158 страницах, включая введение, три главы, общие выводы и заключение, приложение, перечень сокращений, список литературы, содержащий 126 наименований. Материалы содержат 41 рисунок и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена наведению НА на группы объектов при заданных ограничениях и критериях информативности экспериментов.

В начале главы дается краткий обзор публикаций, посвященных математическому обеспечению экспериментов по наблюдению объектов с борта пилотируемых и автоматических КА. Отмечена тенденция к расширению возможностей бортового ПМО (подтвержденная опытом проведения экспериментов на станции «Мир» [1]), а также сделан вывод об актуальности методов целочисленного линейного программирования для решения задач оптимизации наведения НА согласно нескольким критериям, при ограничениях на выполнение наблюдений и расхода ресурсов [2].

Использовать указанные методы позволяет формализация ограничений в виде линейных уравнений и неравенств, а функции оценки информативности – в виде свертки нескольких критериев. Например, в качестве основной оценки информативности для программы дневной съемки наземных объектов, пронумерованных с помощью переменной i , в данной работе используется целевая функция следующего вида [3]:

$$I = \sum_i P_i \varphi_1(h_i) \varphi_2(\chi_i) \varphi_3(s_i) o_i.$$

o_i – бинарная функция, принимающая значение 1, если объект с номером i включен в программу наблюдений, и 0 – в противном случае.

P_i – приоритет объекта с порядковым номером i .

φ_1 – функция угловой высоты Солнца h_i над объектом с номером i .

φ_2 – функция степени ожидаемой облачности χ_i в районе объекта.

Функция φ_3 дает оценку качества информации по предлагаемому в данной работе критерию – ожидаемому пространственному разрешению снимка s_i в районе объекта, которое измеряется в метрах земной поверхности, попавшей в центральную часть кадра, на пиксель цифрового изображения.

На Рис. 1 представлена (в плоскости отклонения оси визирования от надира) геометрическая схема съемки точки V земной поверхности V .

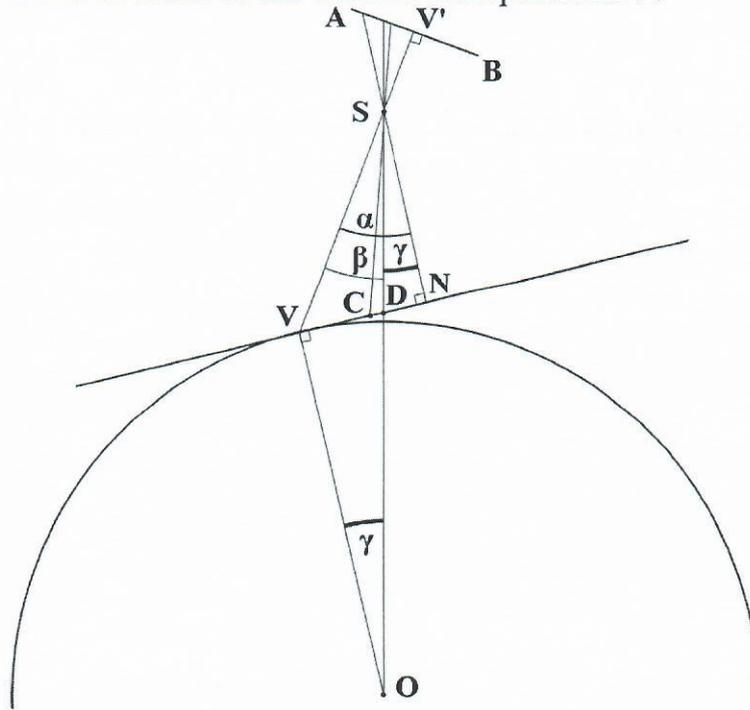


Рис. 1. Геометрическая схема съемки точки V , не совпадающей с надиром

S – фокус оптической системы (на высоте h над Землей), отрезок AB – проекция светочувствительной матрицы на плоскость отклонения, V' – образ точки V на матрице, β – угол отклонения оси визирования от надира. VN – прямая, лежащая в плоскости местного горизонта точки V , SN – перпендикуляр длиной H , опущенный из S на эту плоскость, $|SV'|$ – фокусное расстояние f , C – точка пересечения прямой VN и биссектрисы угла α между направлением на цель SV и перпендикуляром SN . O – центр земной сферы радиусом R_3 .

Снимку приписывается ожидаемое пространственное разрешение $m_V l$, где l – линейный размер пикселя матрицы, а m_V – коэффициент, обратно пропорциональный масштабу центральной части снимка, вычисляемому вдоль направления отклонения оси визирования от надира:

$$m_V = \frac{H}{f \cos^2 \alpha} = \frac{|SV|}{f \cos \alpha} = \frac{(R_3 + h) \cos \gamma - R_3}{f \cos^2 \alpha}, \quad \text{где } \alpha = \arcsin \left(\frac{R_3 + h}{R_3} \sin \beta \right).$$

В данной работе представлен вариант формулировки задачи наблюдений в терминах линейного программирования, который основан на аналогии с одним из способов решения задач маршрутизации транспорта [4, 5, 6].

Задается общий список из N объектов b_i ($i = 1, \dots, N$). В соответствии с баллистическим прогнозом, техническими характеристиками аппаратуры и

заданными ограничениями, а также с учетом особенностей алгоритмов наведения НА на отдельные объекты, формируется набор из M возможных программ наблюдений объектов, каждая из которых представляет собой список выбранных из общего списка неповторяющихся объектов $(p_1^r, p_2^r, \dots, p_{N_r-1}^r, p_{N_r}^r)$, где N_r – число объектов, выбранных для данной программы с номером r ($r = 1, \dots, M$). Для каждой программы вычисляется величина информативности наблюдений c_r . Число используемых КА/ППН обозначается K . задается бинарный коэффициент a_{ir} , который равен 1, если объект b_i выбран для наблюдений в программе r , а в противном случае равен 0.

Вводится бинарный вектор $X = \{x_r, r = 1, \dots, M\}$; значение x_r равно 1, если программа r выбрана для наблюдений, и равно 0 в противном случае. Требуется определить значение вектора X , доставляющее максимум целевой функции

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

при следующих условиях:

$$\sum_{r=1}^M a_{ir} x_r \leq 1, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$$\mathbb{1}^T X = K. \quad (3)$$

Неравенством (2) предписывается, чтобы каждый объект содержался во всех выбранных зонах не более одного раза, а уравнением (3) – чтобы использовались все K из имеющихся КА/ППН. При необходимости указанные условия могут быть модифицированы в соответствии с особенностями задачи.

Подобным образом была сформулирована задача наблюдения максимального возможного числа наземных объектов из 20 заданных с помощью трех ППН, размещенных на одном КА (либо трех КА с примерно одинаковыми параметрами орбит). Одно из ее решений показано на Рис. 2, где трасса полета КА условно представлена осью абсцисс. Слева направо отсчитывается время полета в секундах. Объекты представлены точками T_i , $i = 1, \dots, 20$. Вертикальная координата каждой точки – угловая удаленность объекта от трассы, горизонтальная – момент минимальной удаленности КА от объекта. Максимальная скорость разворота ППН – 6 град/с.

Наведение выполняется следующим образом: ППН (КА) разворачиваются перпендикулярно трассе так, чтобы за 0,5 с до момента наибольшего сближения КА с очередным объектом угол отклонения оси визирования НА от трассы стал равен угловой удаленности объекта от трассы, в течение одной секунды производится съемка (обеспечивая таким образом искусственное рассеивание оси визирования вдоль трассы), после чего начинается разворот перпендикулярно трассе для перехода к следующему объекту. В данном примере перемещение оси визирования НА вдоль трассы происходит только за счет движения КА по орбите. Для решения других задач используются другие алгоритмы наведения НА.

В данном случае решение задачи в формулировке (1–3) показало, что максимальное возможное число наблюдаемых объектов равно 14. Далее была поставлена задача минимизации суммы углов разворотов всех ППН (КА) при условии, что число наблюдаемых объектов равно 14, и при условиях (2–3). Решение именно этой задачи представлено на Рис. 2.

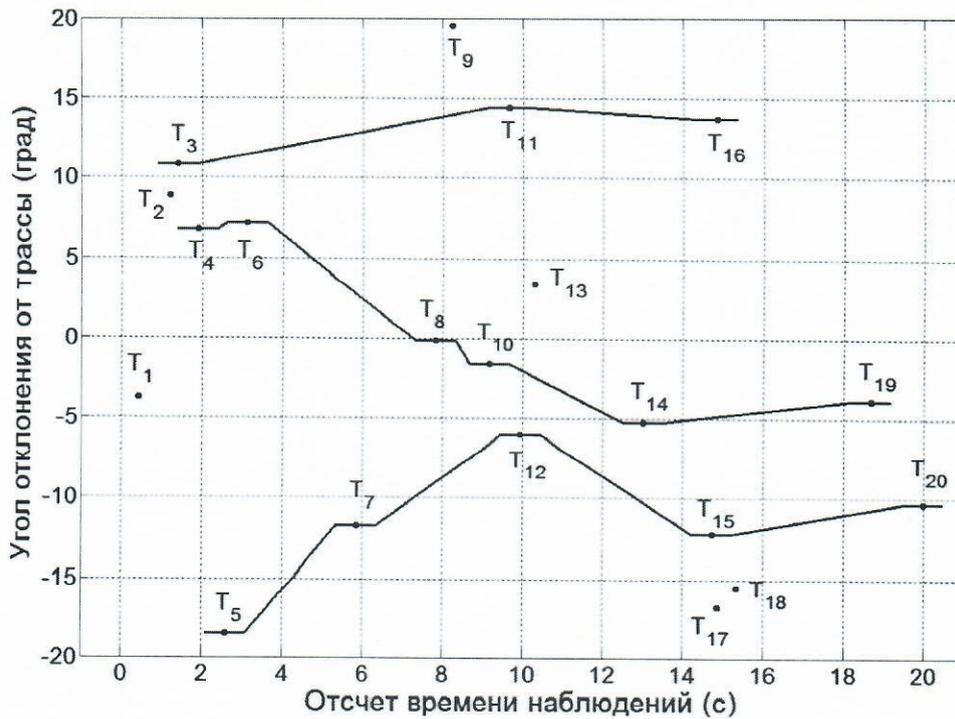


Рис. 2. Схема наблюдений тремя ППН 14 объектов из 20 заданных

В случаях, когда точное решение задачи невозможно из-за чрезмерных вычислительных затрат, используются приближенные методы, применяемые в других научно-технических областях для решения задач, аналогичных задачам маршрутизации транспорта. Не гарантируя оптимального решения в строгом смысле, они могут давать близкие к нему решения, пригодные для практического использования, за относительно небольшое время. Так, задачи, аналогичные представленным на Рис. 2, успешно решаются предложенным в работе алгоритмом на основе генетической эвристики; в качестве «генотипов» используются числовые коды, представляющие программы наблюдений, а в качестве «функций приспособленности» – оценки информативности наблюдений и суммы углов разворотов ППН (КА) с учетом значений штрафных функций, которые соответствуют заданным ограничениям.

На Рис. 3 представлены выполняемые тремя ППН (КА) последовательности наблюдений 50 астрономических объектов в неподвижной относительно звезд инерциальной системе координат.

Оси абсцисс и ординат соответствуют угловым отклонениям α и β оси визирования НА во взаимно перпендикулярных направлениях. Объекты обозначены P_i^k , где k – номер ППН (КА), а i – нумерация, определяющая порядок наблюдения объектов с помощью данной ППН (КА). В данном случае решение задачи производилось эвристическим «муравьиным» алгоритмом. Близкие по эффективности решения были получены также генетическими алгоритмами.

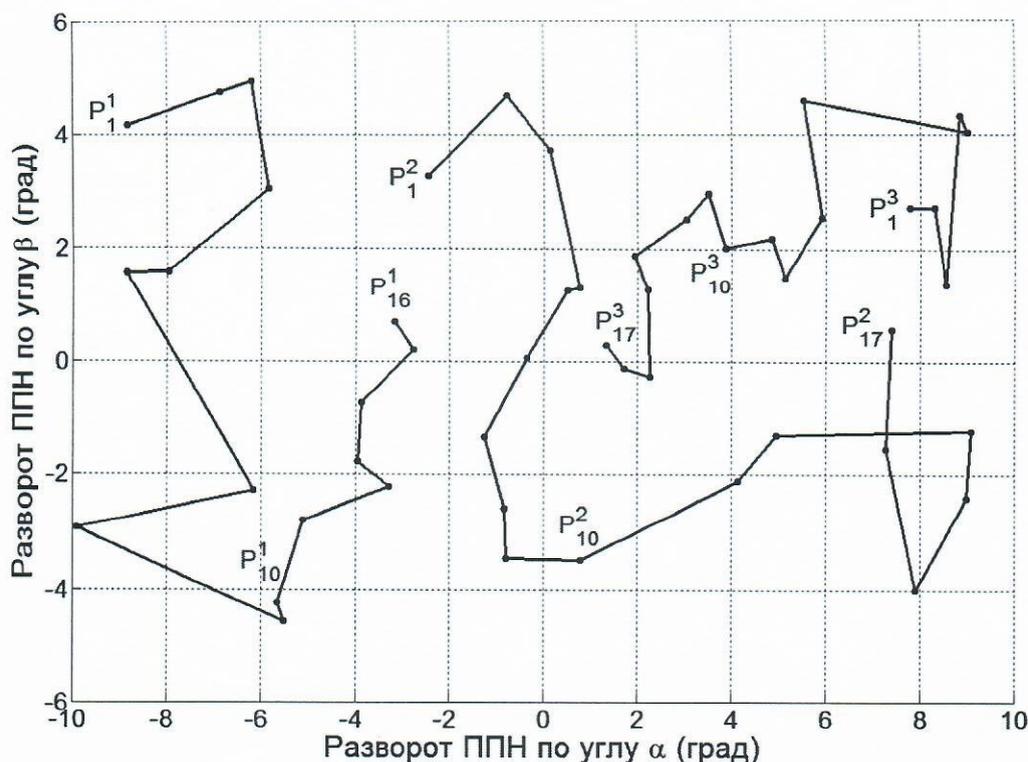


Рис. 3. Схема наблюдений тремя ППН 50 астрономических объектов

Следующий параграф главы посвящен применению предложенных методов для наведения НА МКС. Представлен обзор средств наведения НА, используемой на борту РС МКС в ряде экспериментов по изучению Земли. Отмечено, что выбор возможных вариантов ручного наведения на объекты ограничен, прежде всего, доступным рабочим временем экипажа. Автоматическая съемка производилась при жестко закрепленной на иллюминаторах НА, но ее возможности существенно расширяются благодаря вводу в эксплуатацию новой ППН «СОВА» («Система ориентирования видеоспектральной аппаратуры»), разработанной совместно РКК «Энергия» и НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко (Минск) [7]. ППН устанавливается на иллюминаторы внутри обитаемого пространства РС МКС и способна наводить ось визирования установленной на ней НА автоматически, по заданным программам. ППН изготавливается в двух основных конструктивных вариантах (которые описаны в **приложении** к диссертации) – «СОВА-1» и «СОВА-2», первый из которых наводит ось чувствительности НА путем поворота зеркала [8], а второй – поворотом всей установленной на нем НА. Каждый из указанных вариантов может быть выполнен либо в двухступенной, либо в одноступенной версии. Двухступенная версия ППН «СОВА-1» доставлена на МКС в конце 2019 года.

Специальное бортовое ПМО позволяет управлять наведением не только ППН, но и фотоаппаратов, которые находятся в руках у космонавтов. В этом случае экипаж наводит аппаратуру на визуально неразличимые объекты, следуя подсказкам от угломерной аппаратуры «СКПФ-УМ» («Система координатной привязки фотографий ультразвуковая многомодульная») [9]. Применяемые технические решения запатентованы.

В конце Главы 1 приведены примеры использования предлагаемых методов

для решения задач оптимизации съемок наземных объектов с применением нескольких ППН «СОВА».

В Главе 2, посвященной выбору алгоритмов наблюдений отдельных объектов, прежде всего рассматривается применение вероятностных методов для наведения НА в тех случаях, когда съемка производится без обратной связи (например, визуального контроля), исходя из задаваемых координат цели. Недостаточная точность текущих данных о положении КА, ориентации аппаратуры [10], отсчете времени, географических координатах объекта (например, при решении поисково-спасательных задач) может не позволить с высокой вероятностью сфотографировать объект с первой же попытки. Показано, что в таких условиях значительное повышение вероятности успешных съемок при том же количестве снимков достигается применением искусственного рассеивания, то есть специальным отклонением оси визирования НА от точки наиболее вероятного местонахождения объекта. При определении характеристик искусственного рассеивания используются результаты, полученные академиком А.Н. Колмогоровым в математической теории артиллерийской стрельбы сериями выстрелов по одиночной цели. В применении к фотосъемкам объектов с КА поражению цели снарядом соответствует попадание объекта в кадр фотоснимка, размерам цели стрельбы – размеры кадра, а настройке азимута и прицела – установка двух углов наведения линии визирования на объект [11].

Введение искусственного рассеивания целесообразно, если заданный объект достаточно сфотографировать хотя бы один раз за несколько попыток, а факторы, вызывающие неопределенность данных о положении цели, влияют одновременно на всю серию съемок, то есть фактически являются систематическими ошибками, значения которых априорно не известны с высокой точностью.

Особое практическое значение имеет аналогия с частным случаем стрельбы, в котором установка орудия характеризуется лишь одним настраиваемым параметром [12]. Например, из-за неточности баллистических данных или отсчета времени направление максимальной неопределенности положения наземной цели относительно спутника Земли может совпадать с направлением его движения по орбите. Тогда необходимость введения искусственного рассеивания и его параметры определяются взаимным соотношением планируемого числа снимков n и параметров k и c :

$$k = \sigma / \sigma_{\text{ц}}, \quad c = b / E_{\text{ц}} \approx b / (0,6745 \sigma_{\text{ц}}),$$

где σ – среднее квадратичное отклонение (вдоль направления движения КА) фактического направления оси визирования НА от задаваемого;

$E_{\text{ц}}$ и $\sigma_{\text{ц}}$ – вероятное и среднее квадратичное отклонения положения наземного объекта вдоль направления движения КА;

b – половина линейного размера земной поверхности, попадающей в кадр вдоль направления движения КА.

В качестве одного из примеров приведены условия съемки, когда разброс положения объекта характеризуется величиной $\sigma_{\text{ц}} = 1^\circ$, а отклонение оси визирования от заданного направления – $\sigma = 0,2^\circ$. Съемка производится фотоаппаратом Nikon D5 при фокусном расстоянии объектива 1200 мм, что

соответствует угловым размерам прямоугольного кадра $\alpha_{min} = 1,14^\circ$ и $\alpha_{max} = 1,71^\circ$. Параметр b равен $\alpha_{min}/2 = 0,57^\circ$. Таким образом, $k = 0,2$, $c \approx 0,85$.

Для съемки наиболее вероятного положения цели без рассеивания расчет с помощью численного интегрирования дает вероятности S_1 хотя бы одного попадания цели в кадр, если сделать 6, 12, 18, 24 или 30 снимков (Таблица 1).

Таблица 1.

n	6	12	18	24	30
S_1	0,588	0,628	0,649	0,662	0,672

Положим, то же количество снимков делается при поочередном наведении аппаратуры на три точки; одна из них совпадает с наиболее ожидаемым положением объекта, а остальные расположены симметрично по обе стороны от нее на расстоянии aE_{\perp} вдоль линии неопределенности положения объекта. Численным интегрированием (а также имитационным моделированием) получены оценки вероятностей успешной съемки для разных целых значений a . Наибольшая вероятность успешной съемки достигается при $a = 2$ (Таблица 2).

Таблица 2.

n	6	12	18	24	30
a					
1	0,821	0,850	0,864	0,872	0,878
2	0,904	0,957	0,968	0,971	0,973
3	0,681	0,772	0,817	0,847	0,868

При других значениях параметров k , c , b и n оптимальными могут быть другое число точек наведения и другое расстояние между ними.

Если $\sigma = 0$, то есть аппаратура наводится в заданном направлении практически без случайных отклонений, а $\sigma_{\perp} > 0$, то в одномерном случае наведение производится симметрично в обе стороны от наиболее вероятного положения объекта с шагом $2b$. В двумерном случае съемка области возможного нахождения цели аналогична съемке площадных объектов [13] и ее последовательность может определяться, например, оптимальным использованием механизмов аппаратуры наведения [14].

Следующий параграф Главы 2 посвящен одной из задач прогноза светотеневой обстановки при наведении НА на подстилающую поверхность. Для обеспечения экспериментов по дистанционному зондированию Земли разработано несколько альтернативных методов расчета положения на поверхности планеты блика Солнца (или спутника планеты), видимого с борта КА [15], при этом использовались как принцип Ферма, так и следующий из него закон равенства углов падения и отражения, с применением различных геометрических построений и методов (аналитических и численных) нахождения экстремумов функций. Фигура планеты моделировалась как сферой, так и эллипсоидом.

Далее в работе приведены примеры практической реализации на борту РС МКС наведения НА на наземные цели с использованием искусственного рассеивания. Технологии наведения фотоаппаратов в условиях неопределенности

исходных данных предусмотрены не только для автоматических ППН, но и для ручных съемок с применением угломерной аппаратуры – визуальные подсказки на специальном жидкокристаллическом дисплее и на экране ноутбука, а также автоматическое фотографирование при наведении оси визирования на область возможного местонахождения объекта [14] с учетом скорости и точности перемещений фотоаппарата, выполняемых экипажем. Применяемые технические решения запатентованы.

В **Главе 3** работы рассматриваются способы определения орбиты КА по снимкам поверхности планеты, сделанным с его борта. Дается краткий обзор публикаций на эту тему и далее автором предлагается подход, который отличается от предложенных в рассмотренной литературе.

Каждый снимок проходит автоматизированную процедуру ортотрансформирования, то есть привязки к ортофотоплану местности – карте-фотомозаике, составленной из ранее полученных изображений планеты, приведенных к ортогональной проекции [16]. В результате снимок также преобразуется в ортогональную проекцию и для каждого его пикселя определяются географические координаты соответствующей точки земной поверхности. Это позволяет разрабатывать специальные алгоритмы определения точки съемки (то есть положения КА в момент фотографирования), выбирая в качестве исходных данных практически любые точки на снимке и соответствующие им точки земной поверхности. При этом, зная фокусное расстояние оптической системы фотоаппарата и геометрические размеры его светочувствительной матрицы, можно определить угол между двумя отрезками, соединяющими точку съемки с двумя точками земной поверхности, выбранными на изображении.

В данной работе предложены новые способы определения точки съемки, использующие следующее свойство, которое иллюстрируется на Рис. 4 слева – множество точек в плоскости рисунка, из которых отрезок OP виден под одним и тем же заданным углом φ , составляет часть окружности, лежащую с той стороны от отрезка, которая соответствует заданному углу. Радиус и положение центра окружности определяются положением и длиной отрезка, а также заданным углом [17].

В пространстве множество таких точек образуется вращением показанной на Рис. 4 слева окружности вокруг отрезка OP и представляет собой закрытый тор. Если выбраны несколько пар точек, видимых под известными углами и имеющих известные координаты, то положение точки съемки определяется численными методами из условия минимизации расстояний от искомой точки до всех торов, соответствующих выбранным парам точек.

Если же известна плоскость, которой принадлежит точка съемки, это позволяет разрабатывать алгоритмы, использующие упрощенные численные и аналитические методы. Так, на Рис. 4 справа показан случай, когда точка съемки S лежит в той же плоскости, что и точки земной поверхности A , B и C , для которых известны координаты и углы между направлениями на них из точки S . Тогда на отрезках AB и BC предлагаемым в работе способом могут быть построены

окружности, одной точкой пересечения которых является искомая точка съемки S , а другой – точка B .

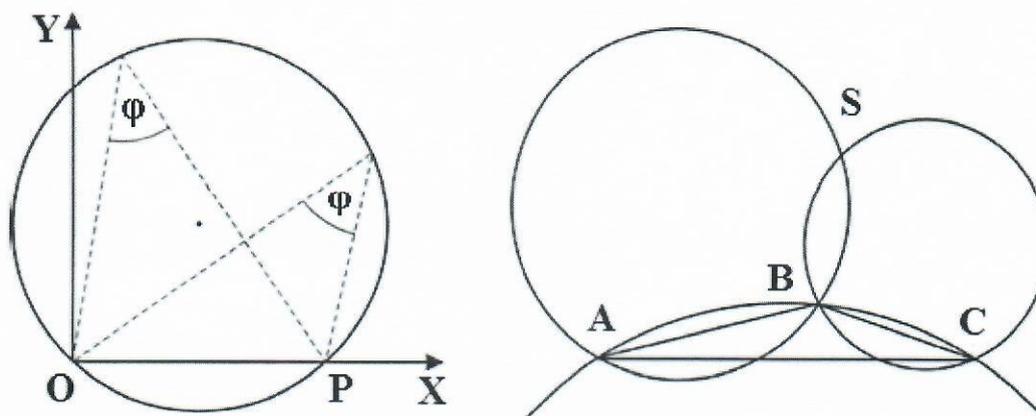


Рис. 4. Определение точки съемки с помощью окружностей, задаваемых отрезками, а также углами, под которыми эти отрезки видны

При практической отработке предложенных алгоритмов использовались, как правило, снимки, сделанные с борта РС МКС штатными серийными фотоаппаратами и, главным образом, в ходе плановых научных экспериментов по изучению Земли [18, 19, 20].

На Рис. 5, где показан ночной снимок Тегерана, иллюстрируется способ определения точек A , B и C на фотографиях, сделанных не в надир. Вписанная в исходный снимок условная окружность при переходе в ортогональную проекцию преобразовалась в вытянутую фигуру, напоминающую эллипс. Выбраны две самые удаленные друг от друга точки A и C этой фигуры, а также отмечена точка B , соответствующая центру снимка. Точка съемки лежит в плоскости, проходящей через эти три точки; причем угол между направлениями из точки фокуса объектива фотоаппарата на точки A и B , как и на точки B и C , равен половине угла раствора объектива.

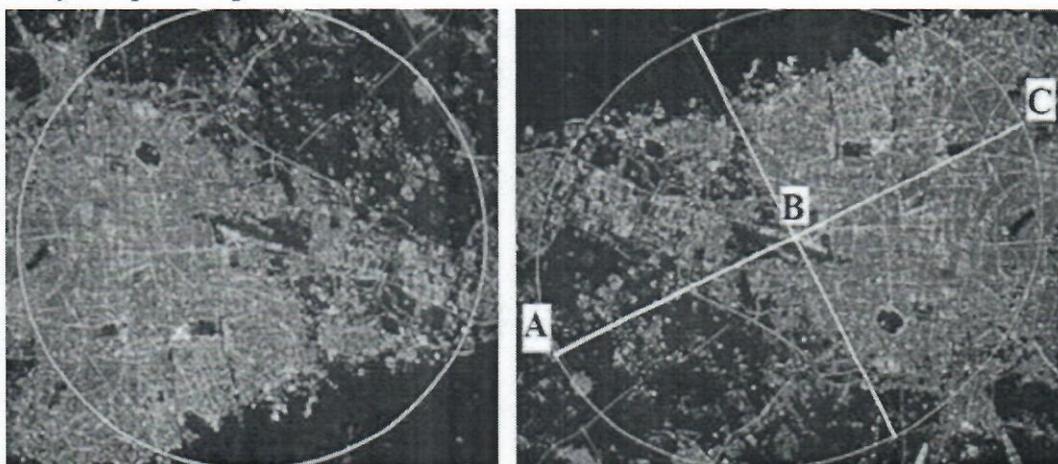


Рис. 5. Исходный (слева) и ортотрансформированный (справа) снимки земной поверхности (город Тегеран) с разметкой для обработки

Некоторые алгоритмы могут давать не одно возможное положение точки съемки. Например, если при обработке фотографии на Рис. 5 использовать лишь точки A и C (угол между направлениями на них равен раствору объектива

фотоаппарата), а положение точки съемки уточнять по данным высотомера, полученным в момент съемки, это даст два решения, симметричных относительно перпендикуляра, опущенного в центр отрезка AC . Для выбора реальных точек съемки и определения орбиты в подобных случаях используются дополнительные, в том числе запатентованные, методы организации съемок и анализа их результатов [19, 21, 22].

Точности определения положения точки съемки (около 1–2 км), достигнутой в летных экспериментах на МКС, как правило, достаточно для коррекции неточных исходных данных при наведении НА на наземные объекты. Для этого можно использовать, например, предлагаемый в данной работе способ повышения точности прогноза орбиты по «двухстрочным элементам» путем такой коррекции величины входящих в их состав параметров (коэффициент торможения в атмосфере и среднее движение), чтобы свести к минимуму расхождение между известными на какой-то момент времени координатами КА и прогнозом его положения, сделанным на основе «двухстрочных элементов» [23, 24].

В экспериментах на РС МКС изложенный способ определения положения точки съемки использовался при обработке снимков Земли, в результате чего определялись поправки к показаниям часов аппаратуры (способ запатентован [18]) и уточнялись данные об ориентации НА относительно МКС, что позволяло облегчить опознавание и географическую привязку снимков, а также снизить применение искусственного рассеивания при съемках.

Предлагаемые методы представляются также перспективными для решения задач автономной навигации и определения траекторий движения КА при экспедициях к Луне, в связи с чем были произведены расчеты точек съемок по фотографиям лунной поверхности, сделанным экипажами американских кораблей «Аполлон» [19], а также проведены летные эксперименты с целью определения орбиты МКС, с использованием методов статистической обработки информации, по снимкам, сделанным жестко закрепленным фотоаппаратом в автоматическом режиме [17]. Результаты этих работ представлены в **приложении** к диссертации.

В общих выводах и заключении диссертационной работы сформулированы ее основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе автором получены следующие новые результаты.

1) Решена задача наведения на объекты нескольких комплектов НА одновременно, которая рассматривается как аналогичная задачам маршрутизации транспорта (в частности, «задаче нескольких коммивояжеров»). Для ее решения используются методы линейного программирования и приближенные биоинспирированные эвристические методы.

2) Для решения задач наведения на объекты в условиях значительной неопределенности исходных данных разработаны методы искусственного рассеивания направления съемки на основе математической аналогии с задачами артиллерийской стрельбы.

3) Предложены методы для определения положения КА по фотоснимкам, сделанным с его борта, что позволяет производить уточнение баллистических данных и отсчета времени. Проведены летные эксперименты по определению орбиты МКС с использованием фотоснимков земной поверхности.

4) С учетом особенностей наведения НА на борту МКС предложенные решения реализованы в наземном ПМО подготовки экспериментов и в бортовом ПМО баллистико-навигационного обеспечения экипажа РС МКС.

Предлагаемые методы позволяют увеличить вероятность успешного наведения на заданные районы и повысить, согласно заданным критериям, информативность экспериментов, требующих наведения аппаратуры на заданные объекты, при оптимальном использовании имеющихся ресурсов и возможной неопределенности исходных данных.

Решению этих задач подчинены также методы автономного определения и коррекции данных об орбите КА по сделанным с него фотографиям поверхности планеты. Этот подход также представляет интерес для решения навигационных задач при полетах к Луне и планетам.

Актуальность предлагаемых решений для РС МКС определяется необходимостью наведения НА на исследуемые объекты и возможностями, которые открываются с вводом в эксплуатацию новой аппаратуры (ППН) для наблюдений объектов с борта МКС и перспективной российской ОС. Предлагаемые подходы могут также использоваться для оптимального планирования наведения на заданные объекты НА, установленной на одном или нескольких автоматических КА (например, рое спутников), атмосферных летательных аппаратах, а также для определения их положений в пространстве.

Основные положения и результаты работы представлены в 37 печатных публикациях и обсуждались с участием автора на 8 научных конференциях. Новизна предложенных в работе технических решений, методов управления, ориентирования и определения орбит КА защищена 15 патентами РФ. Достоверность результатов подтверждается их проверкой с помощью альтернативных алгоритмов и практикой применения предложенных методов.

Все описанные в данной работе методы и алгоритмы используются в наземном ПМО при подготовке экспериментов на МКС и обработке их результатов. В бортовом ПМО реализованы функции оптимизации наведения НА на наблюдаемые объекты по заданным критериям и наведения фотоаппаратуры на заданные районы в условиях неопределенности исходных данных. Практическая значимость полученных результатов подтверждена при выполнении экспериментов «Визир», «Ураган», «Сценарий» и «Вектор-Т».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследование турбулентности и внутренних волн в стратосфере по наблюдениям звезд из космоса: 1. Наблюдения и анализ дисперсии мерцаний / П.А. Боровихин [и др.] // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37, № 4. С. 469–486. (1,90 п.л./0,10 п.л.)

2. Управление подвижными платформами при наведении научной аппаратуры на изучаемые объекты в эксперименте «Ураган» на Международной

космической станции / П.А. Боровихин [и др.] // Сборник материалов XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. АО Концерн ЦНИИ Электроприбор. 2017. С. 44–47. (0,35 п.л./0,10 п.л.)

3. Боровихин П.А., Беляев М.Ю., Караваев Д.Ю. Ожидаемое пространственное разрешение снимков как критерий эффективности при планировании съемок Земли // Труды LIV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2020. С. 23–32. (0,48 п.л./0,16 п.л.)

4. Боровихин П.А., Беляев М.Ю., Караваев Д.Ю. Планирование наблюдений наземных объектов с борта МКС несколькими комплектами научной аппаратуры // Труды LV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2021. С. 25–37. (0,60 п.л./0,20 п.л.)

5. Оптимизация наведения научной аппаратуры крупногабаритной орбитальной станции на наблюдаемые объекты / П.А. Боровихин [и др.] // XIV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы XIV мультikonференции. 2021. Т. 3. С. 70–72. (0,10 п.л./0,03 п.л.)

6. Наведение научной аппаратуры Международной космической станции на исследуемые объекты / П.А. Боровихин [и др.] // Космические исследования. 2022. Т. 60, № 1. С. 80–89. (1,1 п.л./0,25 п.л.)

7. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции / П.А. Боровихин [и др.] // Космическая техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 70–80. (1,00 п.л./0,12 п.л.)

8. Способ управления размещенной на космическом корабле переносной аппаратурой наблюдения: патент 2717614 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 23.07.2019; опубл. 24.03.2020. Бюлл. №9.

9. Система ориентирования перемещаемой на борту пилотируемого корабля аппаратуры: патент 2692284 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 30.05.2018; опубл. 24.06.2019. Бюлл. №18.

10. Боровихин П.А., Грибачев К.Г. Оценка погрешности определения ориентации произвольной оси космического аппарата при заданных погрешностях положения осей его строительной системы координат // Труды XLVIII Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2014. С. 216–218. (0,10 п.л./0,05 п.л.)

11. Боровихин П.А. О применении метода искусственного рассеивания при наведении аппаратуры в съемках наземных объектов из космоса // Труды LIII Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2019. С. 118–128. (0,50 п.л./0,50 п.л.)

12. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю., Рассказов И.В. Использование искусственного рассеивания при съемках наземных объектов с МКС // Труды LV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2021. С. 49–61. (0,60 п.л./0,30 п.л.)

13. Система управления размещенной на космическом корабле переносной аппаратурой наблюдения: патент №2725012 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 9.09.2019; опубл. 29.06.2020. Бюлл. №19.

14. Способ ориентирования перемещаемой на борту пилотируемого корабля аппаратуры: патент 2695739 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 17.10.2018; опубл. 25.07.2019. Бюлл. №21.

15. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. О методах расчета блика Солнца (Луны), наблюдаемого на поверхности Земли с борта космического аппарата // Труды LIII Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2019. С. 129–137. (0,43 п.л./0,30 п.л.)

16. Боровихин П.А. Использование снимков земной поверхности для их координатной привязки и определения точки съемки // Труды LIV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2018. С. 57–62. (0,27 п.л./0,27 п.л.)

17. Метод определения орбиты Международной космической станции по выполненным с нее снимкам поверхности Земли / П.А. Боровихин [и др.] // Труды LIV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2020. С. 5–16. (0,50 п.л./0,12 п.л.)

18. Способ определения временной привязки производимых с космического аппарата снимков земной поверхности: патент 2654883 РФ / П.А. Боровихин, Д.Ю. Караваев, М.Ю. Беляев заявл. 30.08.2016, опубл. 23.05.2018. Бюлл. №15.

19. Определение орбиты по выполняемым космонавтами снимкам поверхности Земли и Луны / П.А. Боровихин [и др.] // Космическая техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 88–99. (1,20 п.л./0,30 п.л.)

20. Отработка на МКС технологии автономной навигации с помощью съемок экипажа для задачи облета Луны / П.А. Боровихин [и др.] // Сборник материалов юбилейной XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. АО Концерн ЦНИИ Электроприбор. 2018. С. 7–13. (0,55 п.л./0,12 п.л.)

21. Способ определения орбиты космического аппарата с аппаратурой для съёмки подстилающей поверхности: патент 2709978 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 07.02.2019; опубл. 23.12.2019. Бюлл. №36.

22. Способ определения орбиты космического аппарата: патент 2729339 РФ / П.А. Боровихин [и др.]. заявл. 11.12.2019; опубл. 06.08.2020. Бюлл. №22.

23. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. Алгоритм расчета двухстрочных элементов по заданному вектору состояния // Труды XLVI Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2012. С. 94–102. (0,43 п.л./0,30 п.л.)

24. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. Минимизация ошибок прогноза параметров орбиты, рассчитываемого по «двухстрочным элементам», путем коррекции значений баллистического коэффициента или среднего движения // Труды XLVII Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». 2013. С. 191–200. (0,48 п.л./0,35 п.л.)