

Отработка технологии автономной навигации космических аппаратов дальнего космоса на Международной космической станции

Г. А. Аванесов¹, Б. С. Жуков¹, П. С. Сметанин¹, М. В. Михайлов²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru*

² *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королёва
Королёв, 141070, Московская обл., Россия
E-mail: Mikhail.Mikhailov@rsce.ru*

Международная космическая станция (МКС) создаёт идеальные условия для исследований перспективных приборов, методов и технологий. Подготавливаемый Институтом космических исследований РАН и Ракетно-космической корпорацией «Энергия» эксперимент «Планета» предназначен для сбора данных и отработки технологии автономной навигации космических аппаратов (КА) на основе измерений направлений на звёзды, горизонт планеты и на объекты её поверхности с заранее известными планетоцентрическими координатами. В состав научной аппаратуры (НА) эксперимента входят две цифровые телевизионные камеры: широкоугольная и узкоугольная, а также блок предварительной обработки данных. НА доставляется на борт МКС с помощью грузового КА «Прогресс». Космонавты монтируют НА на обращённой к Земле стороне служебного модуля станции. Получаемые НА данные по сети Ethernet поступают на Laptop, расположенный внутри станции, где дополняются информацией о её положении на орбите, ориентации в пространстве и времени. Обработка данных эксперимента планируется в наземных условиях.

Ключевые слова: оптическая навигация, космический аппарат, орбита, навигационные измерения, горизонт, вектор состояния

Одобрена к печати: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49

С развёртыванием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) принципиально изменился подход к решению навигационной задачи наземных и околоземных объектов. Появилась возможность практически мгновенно и с высокой точностью определять вектор состояния околоземных орбитальных космических аппаратов (КА) (Микрин, Михайлов, 2017). Однако далеко не весь спектр навигационных задач космической техники перекрывается средствами ГНСС. Не охвачены искусственным навигационным полем трассы межпланетных перелётов. Сближение с планетами, астероидами и кометами, а также посадка на них возможны сегодня только с использованием средств автономной навигации.

В 80-х гг. прошлого века разрабатываемые Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) телевизионные приборы дважды использовались в навигационных целях в проектах по исследованию планет и малых тел Солнечной системы. В проекте «Вега» телевизионная система использовалась для выполнения угловых измерений для осуществления сближения межпланетных станций с ядром кометы Галлея в 1986 г. (Телевизионная..., 1989). В 1988 г. с помощью телевизионных приборов решалась аналогичная задача в проекте «Фобос» (Телевизионные..., 1994).

Интерес к использованию телевизионных приборов для припланетной навигации вновь возник в конце 90-х гг. прошлого века в связи с проектом «Фобос-Грунт». Для этого проекта в ИКИ РАН была разработана и прошла полный цикл наземной отработки телевизионная система навигации и наблюдения (Аванесов и др., 2010). В состав системы вошли два звёздных датчика ориентации БОКЗ-МФ (блок определения координат звёзд) и четыре телевизионные камеры: две узкоугольные навигационные камеры (УНК) и две широкоугольные (ШНК). Телевизионные камеры были снабжены вычислительными устройствами и предназначались для угломерных измерений при сближении автоматической межпланетной станции

(АМС) с Фобосом, выбора места посадки, а также для участия в управлении процессом посадки. К сожалению, в 2011 г. ракета-носитель вывела АМС «Фобос-Грунт» на нерасчётную орбиту, и станция окончила свой путь в водах Атлантического океана.

Несмотря на неудачу проекта «Фобос-Грунт», работы по созданию методов и средств автономной припланетной навигации продолжились, в первую очередь в интересах будущих лунных миссий. При этом состав технических средств перспективной телевизионной системы для припланетной навигации не изменился. Изменились в лучшую сторону параметры входящих в неё приборов. На смену звёздным датчикам БОКЗ-МФ пришли приборы мБОКЗ-2 (Аванесов и др., 2018). Сменились и камеры: ШНК получила сверхширокоугольный объектив типа «рыбий глаз» (*англ.* fish-eye), УНК может комплектоваться разными объективами с фокусными расстояниями от 23 до 125 мм.

Новый этап обработки оптической системы автономной навигации планируется провести на борту Международной космической станции (МКС) в рамках эксперимента «Планета». Проведение эксперимента обусловлено необходимостью отработки методов навигации по горизонту Земли и ориентирам на её поверхности в условиях реальной облачности. Данные требуются для разработки программного обеспечения обработки изображений и формирования по ним навигационных измерений для навигационной камеры (НК) — системы автономной навигации пилотируемого транспортного корабля, разрабатываемого в настоящее время Ракетно-космической корпорацией «Энергия» для полётов к Луне.

Задачи, решаемые в результате эксперимента:

- получение большого объёма наблюдений горизонта планеты и изображений участков её поверхности в окрестностях подспутниковой точки;
- отработка методов автономной навигации по широкоугольным и узкоугольным измерениям поверхности планеты, интегрированным с измерениями звёздного датчика;
- отработка программного обеспечения (ПО) обработки изображений и формирования кватерниона ориентации и параметров орбиты КА.

В эксперименте «Планета» будет использоваться научная аппаратура в составе двух камер: ШНК и УНК, а также блока предварительной обработки данных (БОД-П), собранных в виде моноблока на установочной платформе, которая будет доставлена на МКС с помощью КА «Прогресс МС». На служебном модуле (СМ) станции имеются специально подготовленные места для установки НА. Они оборудованы специальными креплениями и разъёмами, позволяющими подключить НА к электропитанию и к сети Ethernet. Космонавту предстоит вынести из МКС моноблок НА и установить его на обращённой к Земле стороне СМ. При этом БОД-П подключается к маршрутизатору МАН4000 Hirschmann, установленному внутри СМ МКС, по двум независимым линиям Ethernet и к электропитанию. Схема подключения НА к системам МКС показана на *рис. 1* (см. с. 43).

Доставляемая на борт МКС НА предназначена для сбора экспериментального материала. Изображения земной поверхности, получаемые с помощью камер ШНК и УНК, через БОД-П по сети Ethernet поступают на расположенный внутри станции Laptop (портативный компьютер) HP Zbook. Каждый кадр ШНК и УНК при передаче на Laptop сопровождается данными баллистико-навигационного обеспечения (БНО): информацией о текущем времени, параметрами ориентации МКС, её положением на орбите, а также цифровой телеметрией.

Предполагается, что эксперимент будет проводиться в сеансном режиме одним членом экипажа. Работа с НА будет представлять собой запуск полуавтоматической программы специального программного обеспечения на Laptop — штатном оборудовании СМ МКС. Длительность непрерывных измерений одного сеанса — 4–6 сут. Экипаж обеспечивает запуск сеанса, контроль приёма информации на Laptop и далее её передачу на Землю. Сеансы будут проводиться каждые три месяца в течение года. Ожидаемая длительность эксперимента — один год. После проведения научного эксперимента и передачи накопленных данных на Землю по ним должна проводиться отработка программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) автономной навигации.

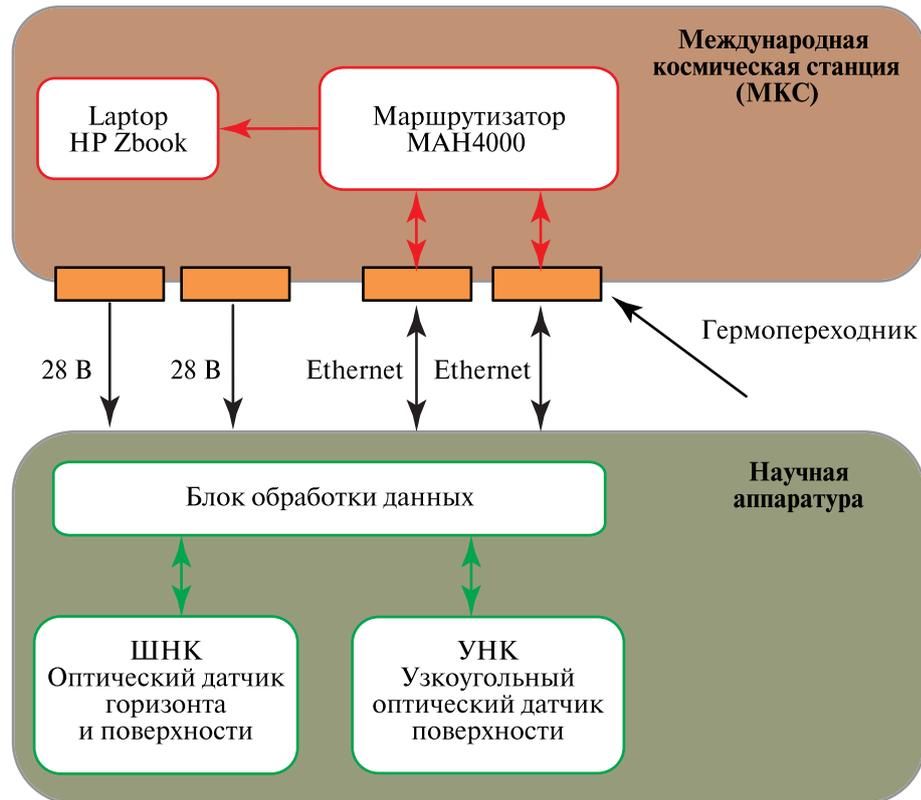


Рис. 1. Обобщённая схема подключения научной аппаратуры к системам МКС

Исследуемая в проекте НА технология автономной навигации основывается на синхронных, привязанных к точному времени измерениях направлений на звёзды небесной сферы, на горизонт Земли и на объекты земной/лунной поверхности с заранее известными координатами (контрольные точки — КТ). Измерения направлений на звёзды в данном проекте выполняются звёздными приборами БОКЗ, установленными на МКС и используемыми для управления угловым движением станции. Получаемые с их помощью данные содержатся в БНО. Звёздные датчики ориентации разработаны и изготовлены в ИКИ РАН и эксплуатируются на МКС с 2000 г.

Наблюдения горизонта и поверхности планеты выполняются с помощью камер ШНК и УНК. Звёздные датчики и камеры образуют единое координатное пространство. Соответственно, измерения параметров ориентации КА по звёздам небесной сферы выполняются в инерциальной системе координат. Измерения направлений на горизонт планеты и на объекты её поверхности ведутся в связанной с поверхностью планеты вращающейся планетоцентрической системе координат. Связь между планетоцентрической и инерциальными системами координат осуществляется на основании привязки измерений НК к абсолютному времени и позволяет пересчитывать полученные измерения в координаты подспутниковой точки на планете, положение центра масс КА на орбите и определять его ориентацию в инерциальном пространстве.

Принципы измерения навигационных параметров иллюстрирует рис. 2 (см. с. 44). На рисунке схематично показан КА с установленными на нем приборами: двумя звёздными датчиками ориентации и телевизионным датчиком горизонта с углом поля зрения 180° . При определённых условиях освещения датчик «видит» линию горизонта. В зависимости от высоты орбиты расстояние до линии горизонта L_g изменяется. Меняется и угловой размер планеты, а также соотношения сторон в треугольнике OGC , но сохраняется прямой угол между OG и GC во множестве треугольников, образующих линию горизонта. При этом OC представляет собой радиус-вектор КА, исходящий из геометрического центра планеты и определённый в приборной системе координат ШНК. Сделанный телевизионным датчиком единичный

снимок горизонта в зависимости от расстояния до планеты может содержать от нескольких десятков до нескольких тысяч точек, интерпретируемых как принадлежащие к линии горизонта. При этом длина линии горизонта может быть весьма велика: до тысяч и десятков тысяч километров.

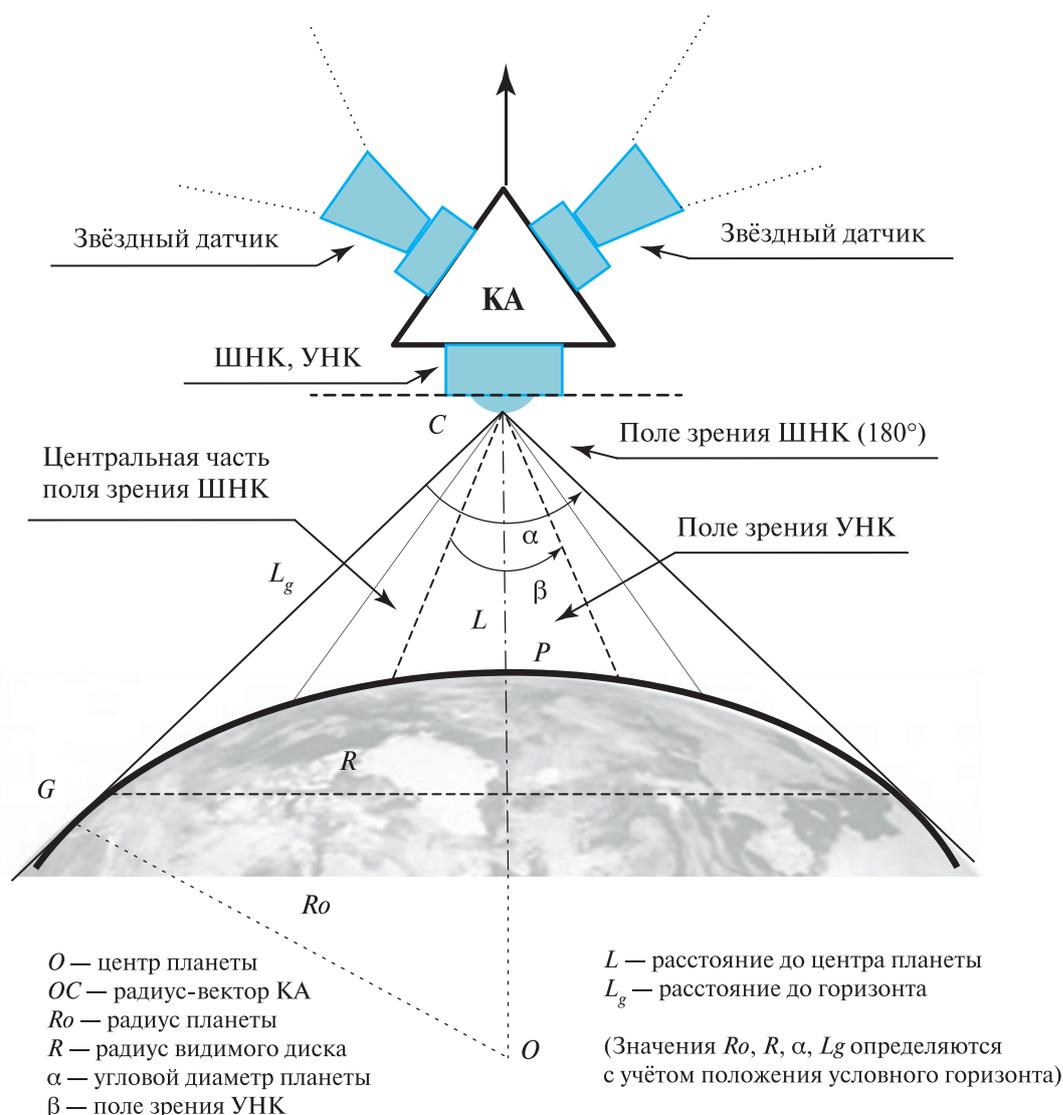


Рис. 2. Иллюстрация принципов измерения радиус-вектора КА

Воображаемая линия, построенная в направлении радиус-вектора КА, пройдя через КА, проецируется на небесную сферу. Выполняющиеся синхронные с датчиком горизонта наблюдения звёздных датчиков, благодаря связанной системе координат приборов, фиксируют положение проекции радиус-вектора КА на небесную сферу в инерциальной системе координат на данный момент времени. Используя измерения абсолютного времени, точка пересечения радиус-вектора КА с поверхностью планеты, подспутниковая точка (ПСТ), получает свои координаты в планетоцентрической системе.

Вычисленное таким образом направление на геометрический центр планеты, естественно, не совпадает с направлением на центр масс. Кроме того, в случае Земли навигация по горизонту усложняется обстоятельством, что истинный горизонт в оптическом диапазоне длин волн из космоса не виден из-за большой оптической толщины атмосферы при скользких углах наблюдения. Вокруг Земли наблюдается лимб — светящийся за счёт рассеяния

солнечного излучения слой атмосферы толщиной в десятки километров. Поэтому привязка навигационных измерений возможна лишь по условному горизонту, который может определяться, например, по признаку максимального градиента яркости на лимбе Земли. В этом случае под радиусом Земли нужно понимать расстояние от центра Земли до условного горизонта. Проблема здесь состоит в том, что высота условного горизонта и её зависимость от условий наблюдения (в первую очередь облачности) неизвестна. Поэтому одна из задач эксперимента «Планета» состоит в привязке высоты условного горизонта по высоте, исследовании неустойчивости этой привязки в зависимости от условий наблюдения, прежде всего облачности, и в оценке влияния неустойчивости привязки на точность навигационных измерений.

Ожидается, что для Земли, наблюдаемой с высоты 400 км, ошибка измерения координат ПСТ может составлять 3–4 км (1σ) на земной поверхности (Жуков и др., 2015). С этой точностью осуществляется геопривязка центральной части поля зрения ШНК размером 830×830 км, в пределах которой может находиться достаточно много контрольных точек — участков местности с заранее известными географическими координатами.

Разрешающая способность ШНК с высоты 400 км составляет около 614 м/пиксель. Такого разрешения достаточно, чтобы распознавать крупномасштабные образования на поверхности Земли.

Рисунок 3 поясняет изложенное. В центре рисунка показан снимок полного диска Земли. Такие снимки будут формировать ШНК. Слева показана локализованная на нём дуга горизонта, по которой проводился расчёт координат подспутниковой точки. Справа показан участок земной поверхности, отобразившийся на том же снимке. На участке находится некоторое число контрольных точек, которые хранятся в памяти прибора.



Рис. 3. Снимок полного диска Земли (в центре) и определяемые по нему дуга горизонта (слева) и изображение береговой линии (справа)

Дальнейшее уточнение радиус-вектора КА и координат подспутниковой точки проводится на основе распознавания контрольных точек на центральной части того же снимка ШНК.

По уточнённому положению ПСТ определяется район поиска контрольных точек на синхронно полученном снимке УНК, соответствующий её полю зрения 200×200 км с высоты 400 км. В этом суженном районе распознаются контрольные точки более высокого разрешения (~ 100 м), соответствующего разрешению УНК, и по результатам их распознавания происходит дальнейшее уточнение радиус-вектора КА. Необходимо отметить, что вследствие относительно малого углового поля зрения УНК, составляющего $27,5^\circ$, высота КА оценивается по данным УНК со значительно худшей точностью, чем координаты ПСТ.

На протяжении ряда лет методика автоматического распознавания контрольных точек обрабатывается ИКИ РАН по снимкам, получаемым камерами МСУ-201 и МСУ-202 (Жуков и др., 2018). Камеры входят в комплекс многозональной спутниковой съёмки (КМСС-М) на КА «Метеор-М» № 2, который разработан и изготовлен в ИКИ РАН. Камеры имеют разрешение около 60 м. За основу берётся банк данных Landsat, содержащий около 3 млн КТ с разрешением 30 м, и банк КТ Sentinel, имеющий разрешение 10 м и разрабатываемый в ИКИ РАН в отделах оптико-физических измерений и технологий спутникового мониторинга.

Идентификация КТ на изображениях КМСС-М проводится корреляционными методами. На *рис. 4* приводится пример фрагмента изображения МСУ-201, на котором показаны идентифицированные контрольные точки Sentinel.

Конструкция камер ШНК и УНК показана на *рис. 5*.

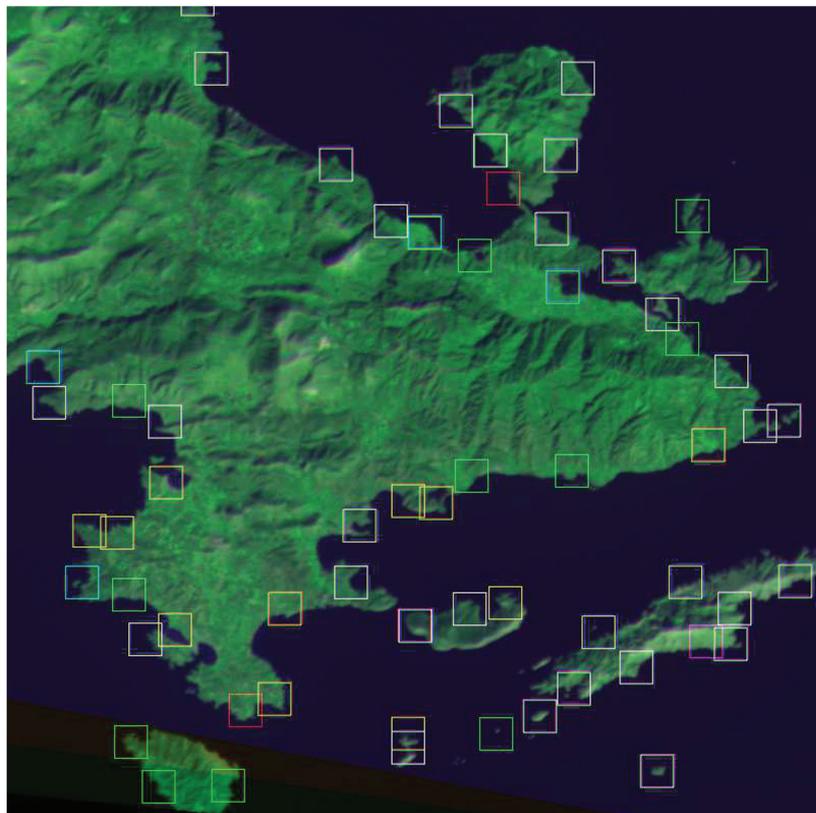


Рис. 4. Контрольные точки Sentinel на изображении МСУ-201. Разными цветами показаны контрольные точки, детектированные в разных спектральных каналах (Жуков и др., 2018)

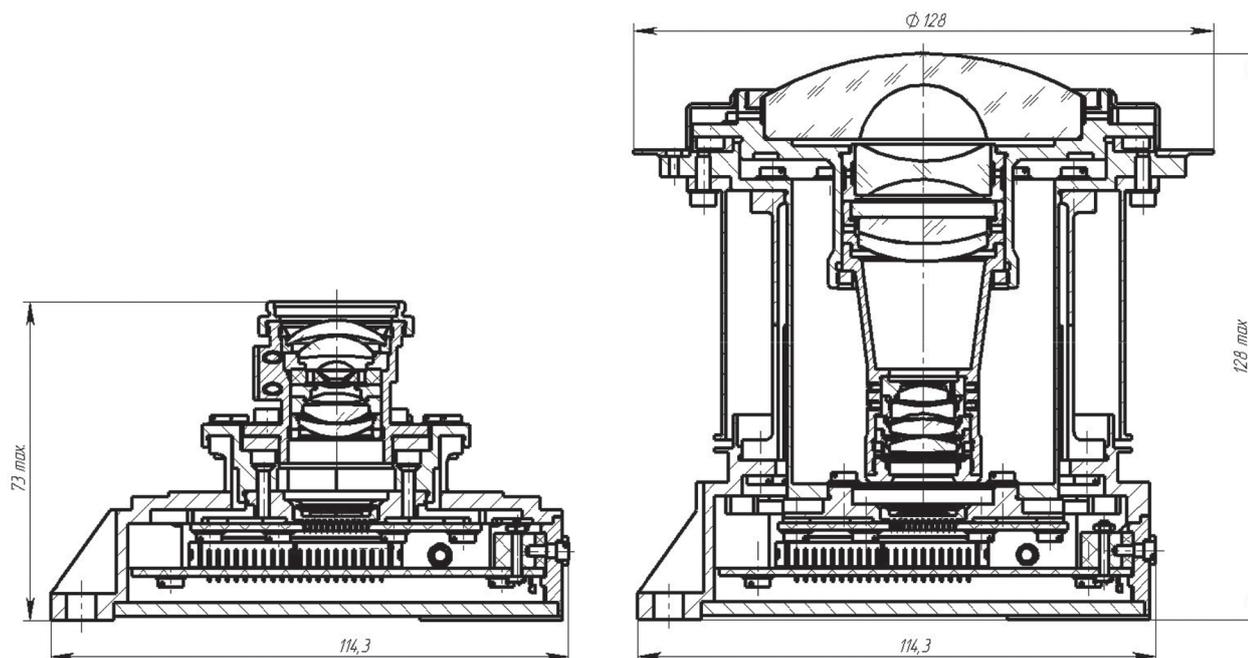


Рис. 5. Конструкция камер ШНК и УНК

Основные технические характеристики ШНК и УНК и оценки точности проводимых с их помощью навигационных измерений приведены в *таблице*. Указанные оценки точности подлежат подтверждению в эксперименте.

Основные технические характеристики ШНК и УНК при высоте орбиты 400 км

	ШНК		УНК
	горизонт	поверхность	
Угол поля зрения, град	180×180	90×90	27,5×27,5
Угловое разрешение, угл. с/пиксель	316	316	49,3
Захват на земной поверхности, км	—	830×830	200×200
Разрешение на земной поверхности, м	3500	614	97
Точность единичного измерения (1σ):			
• координат ПСТ, м	3000–4000	~600	~100
• высоты орбиты, м	3000–4000	~1200	~1000
Число контрольных точек в бортовом каталоге:	—		
• для Земли		8000	150000
• для Луны		10000	
Объём информации бортового каталога контрольных точек, Мбайт:	—		
• для Земли		8	150
• для Луны		30	

Измерения, выполненные ШНК и УНК в реальном полёте, вместе с другой навигационной информацией поступают в навигационный процессор КА, в котором по серии измерений с учётом знания модели движения КА определяется его орбита.

Для КА, находящегося на околоземной или окололунной орбите, решение навигационной задачи заключается в определении текущих параметров орбиты (вектора состояния), в качестве которых будем использовать текущий вектор координат \bar{X} и его скорость $\dot{\bar{X}}$ в гринвичской системе координат или, соответственно, в лунной системе координат. Зная эти векторы и модель движения КА, можно определить векторы координат и скорости в любой момент времени. Для определения вектора состояния могут использоваться навигационные измерения различных типов. В данном случае предполагается, что по проводимым измерениям НК в каждый момент времени (рассматривается дискретность 1 с) определяется измеренный единичный вектор направления из центра Земли на КА \bar{r}_u . Учитывая более низкую точность измерения высоты КА с помощью УНК, результаты измерений высоты в данном случае не используются. Вектор \bar{r}_u включает в себя ошибки измерений и сопровождается признаком достоверности. Ошибки измерений определяются оптическими характеристиками НК, характеристиками текущих ориентиров (чёткостью их изображения, геометрией, облачной зашумленностью). Основным фактором, влияющим на достоверность измерений на околоземной орбите, является облачность. Наличие и уровень облачности носят вероятностный характер. На окололунной орбите все измерения, выполненные на светлой стороне Луны, считаются достоверными.

Вектор измерений \bar{r}_u из требуемых шести параметров орбиты одномоментно определяет только два: координаты КА в плоскости местного горизонта. Поэтому для определения текущего вектора состояния необходимо проводить серию измерений на некотором временном интервале, по которым определяется орбита, наилучшим образом ложающаяся на эту серию измерений. Такой процесс определения орбиты по неполным избыточным измерениям с использованием модели движения КА называется динамической фильтрацией выполняемых измерений. При большом количестве измерений за счёт их избыточности точность оценки орбиты может повышаться. Степень повышения точности зависит от типа проводимых измерений, их избыточности и коррелированности. Например, если какими-либо навигационными

средствами (в частности, средствами аппаратуры спутниковой навигации) одновременно измеряются все шесть параметров орбиты, то при одном и том же количестве и точности измерений точность формируемой оценки орбиты будет выше, чем в случае проведения неполных измерений (как, например, измерения НК). Увеличение числа измерений за счёт статистического осреднения ошибок измерений обеспечивает повышение точности формируемой оценки орбиты. Однако если ошибки измерений коррелированы на больших интервалах времени, то повышение числа измерений на этих интервалах практически не влияет на точность формируемой оценки. На точность оценки орбиты влияет точность знания модели движения КА, накладывающая ограничения на постоянную времени динамической фильтрации. Чем больше постоянная времени, тем лучше осредняются ошибки измерений, но тем больше сказываются ошибки модели. Уменьшение постоянной времени обеспечивает снижение влияния ошибок модели на точность формируемой оценки, но при этом усиливается влияние ошибок измерений. Поэтому существует некоторый оптимум постоянной времени фильтра, при котором ошибки оценки орбиты, обусловленные ошибками измерения и ошибками модели движения КА, становятся примерно равными.

В качестве основного фактора возмущения модели движения КА рассматриваются ошибки модели гравитационного поля Земли и Луны. Например, сегодня на МКС для выполнения динамической фильтрации навигационных измерений реализована модель гравитационного поля Земли порядка 72×72 .

Кроме ошибок измерений по наземным ориентирам на точность формируемой оценки влияют ошибки ориентации КА, определяемой по звёздным датчикам (ЗД). В настоящее время достигаемая точность ориентации по ЗД составляет величину $\sim 1''$, что соответствует ошибкам наведения оптической аппаратуры на наземные ориентиры с высоты 400 км величиной ~ 2 м. Эта точность существенно превышает реализуемую точность измерений по наземным ориентирам, поэтому в данном случае ошибками измерения ориентации КА можно пренебречь.

Таким образом, в ходе эксперимента «Планета» на МКС будут отлажены алгоритмы автономных оптических навигационных измерений по горизонту Земли и ориентирам на её поверхности в условиях реальной облачности, отработаны методы полётной калибровки аппаратуры, разработаны математические модели ошибок измерений, отлажены алгоритмы динамической фильтрации и определения орбиты по данным навигационных измерений. Полученные результаты будут использованы при разработке программно-алгоритмического обеспечения навигационной камеры пилотируемого транспортного корабля.

Литература

1. Аванесов Г.А., Гордеев Р.В., Гришин В.А., Жуков Б.С., Жуков С.Б., Коломеец Е.В., Краснопецева Е.Б., Куделин М.И., Крупин А.А., Муравьев В.М., Форш А.А. Телевизионная система навигации и наблюдения // *Астроном. вестн.* 2010. Т. 4. № 5. С. 473–479.
2. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Никитин А.В., Сазонов В.В. Оценка точности определения ориентации системы звездных датчиков по экспериментальным данным // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 1. С. 47–61.
3. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Форш А.А. Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12. № 2. С. 61–76.
4. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. Автоматизация полетной геометрической калибровки комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15. № 6. С. 201–2012.
5. Микрин Е.А., Михайлов М.В. Навигация космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 345 с.
6. Телевизионная съемка кометы Галлея / ред. Р.З. Сагдеев. М.: Наука, 1989. 295 с.
7. Телевизионные исследования Фобоса / ред. Г.А. Аванесов. М.: Наука, 1994. 198 с.

Testing the technology of deep space spacecraft autonomous navigation at the International Space Station

G. A. Avanesov¹, B. S. Zhukov¹, P. S. Smetanin¹, M. V. Mikhailov²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

² Korolev Rocket and Space Corporation Energia
Korolev 141070, Moscow Region, Russia
E-mail: Mikhail.Mikhailov@rsce.ru

The International Space Station (ISS) provides ideal conditions for testing new instruments, methods and technologies. The Planet experiment, which is being prepared by Space Research Institute RAS and Rocket and Space Corporation Energia, is intended to collect data and test the technology of autonomous spacecraft navigation based on measurements of directions to the stars, to the planet's horizon and ground control points. The scientific instrumentation (SI) of the experiment includes a wide- and a narrow-angle cameras and a data preprocessing unit. The SI is to be delivered on board the Station using the Progress cargo spacecraft. The cosmonauts will mount the SI on the side of the ISS Service Module facing the Earth. The data received by the SI via Ethernet will be fed to a laptop located inside the Station, where it will be supplemented with information about the image acquisition time, ISS orientation and position in orbit. The experimental data will be processed on-ground.

Keywords: optical navigation, spacecraft, orbit, navigational measurements, horizon, state vector

Accepted: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49

References

1. Avanesov G. A., Gordeev R. V., Grishin V. A., Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kolomeets E. V., Krasnopevtseva E. B., Kudelin M. I., Krupin A. A., Murav'ev V. M., Forsh A. A., *Televizionnaya sistema navigatsii i nablyudeniya* (Television system of navigation and observation), *Astronomicheskii Vestnik*, 2010, Vol. 4, No. 5, pp. 473–479.
2. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Nikitin A. V., Sazonov V. V., *Otsenka tochnosti opredeleniya orientatsii sistemy zvezdnykh datchikov po eksperimental'nym dannym* (Accuracy estimation of star sensors system orientation determination from experimental data), *Kosmicheskie issledovaniya*, 2018, Vol. 56, No. 1, pp. 47–61.
3. Zhukov B. S., Zhukov S. B., Forsh A. A., *Vozmozhnosti navigatsionnykh izmerenii po limbu Zemli v vidimom i blizhnem IK diapazone* (Potential of Earth limb navigation measurements in the visible and near-IR spectral range), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 61–76.
4. Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kondrat'eva T. V., Nikitin A. V., *Avtomatizatsiya poletnoi geometricheskoi kalibrovki kompleksa mnogozonal'noi sputnikovoi s'emki KMSS-M na KA "Meteor-M" No. 2* (Automation of in-flight geometric calibration of Multispectral satellite imaging system KMSS-M on-board Meteor-M No. 2 satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 201–2012.
5. Mikrin E. A., Mikhailov M. V., *Navigatsiya kosmicheskikh apparatov po izmereniyam ot global'nykh sputnikovykh navigatsionnykh system* (Spacecraft navigation using measurements from the global satellite navigation system), Moscow, 2017, 345 p.
6. *Televizionnaya s'emka komety Galleya* (TV surveying of comet Halley), R. Z. Sagdeev (ed.), Moscow: Nauka, 1989, 295 p.
7. *Televizionnye issledovaniya Fobosa* (Television investigations of Phobos), G. A. Avanesov (ed.), Moscow: Nauka, 1994, 198 p.