

Стенд для отработки технологии автономной припланетной навигации

Г. А. Аванесов, Б. С. Жуков, П. С. Сметанин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Сближение с планетами и малыми телами Солнечной системы, а также посадка на них требуют применения методов и средств автономной навигации космических аппаратов. Разрабатываемый в Институте космических исследований РАН стенд предназначен для моделирования условий наблюдения звёзд, Земли и Луны телевизионными приборами, входящими в состав системы автономной припланетной навигации на трассе полёта Земля–Луна–Земля. Стенд состоит из нескольких компьютеров и средств отображения, на которых с помощью специально разработанной программы «Генерация» воспроизводятся изображения звёзд, Земли и Луны в масштабе и ракурсах, соответствующих положению космического аппарата на трассе полёта. Средства стенда позволяют моделировать условия наблюдения обеих планет на всех участках полёта, включая посадку на поверхность Луны. Для формирования изображений используются каталог звёзд Hipparcos, топографические модели Луны LOLA, а также материалы космической съёмки Земли. В состав стенда включены средства обработки данных, получаемых приборами системы автономной оптической навигации, а также программа «Арбитр», позволяющая оценить точность навигационных измерений сравнением заданных стендом и измеренных параметров полёта. Приводятся примеры получаемых на стенде изображений и результаты выполненных по ним навигационных измерений по горизонту планеты и по контрольным точкам на её поверхности.

Ключевые слова: каталог звёзд, контрольные точки, горизонт, ориентация, оптическая навигация, звёздный датчик, математическая модель, инерциальное пространство

Одобрена к печати: 28.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117

Сближение с планетами и малыми телами Солнечной системы, а также посадка на них требуют применения методов и средств автономной навигации космических аппаратов (КА). Важная роль в решении этих ответственных задач традиционно отводится телевизионным приборам, хорошо зарекомендовавшим себя во многих проектах. В качестве примера можно привести систему автономной навигации, использовавшуюся при пролёте мимо малых тел Солнечной системы (Bhaskaran, 2012), при посадке на ядро кометы (Kubota et al., 1999) и при недавней посадке марсохода Perseverance (<https://mars.nasa.gov/mars2020/mision/technology/#Terrain-Relative-Navigation>).

В отечественной практике телевизионные приборы были впервые применены для управления сближением с ядром кометы Галлея в 1984–1986 гг. (проект «Вега»). Непосредственно при пролёте КА мимо ядра кометы телевизионная система использовалась для автоматического наведения платформы с научными приборами на объект наблюдения. При этом для наземной отработки телевизионной системы проекта использовался специально разработанный для этих целей стенд (Телевизионная..., 1989). Ещё раз телевизионные средства измерения успешно применялись в проекте «Фобос» в 1988–1989 гг. (Телевизионные..., 1994).

Телевизионные средства планировалось использовать для управления сближением и посадкой на Фобос спускаемого аппарата (проект «Фобос-Грунт») в 2011 г. Специально для этого проекта были разработаны новые приборы: солнечные датчики ориентации ОСД (оптический солнечный датчик), звёздные датчики ориентации БОКЗ-МФ (блок определения координат звёзд), а также телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН) в составе четырёх камер, снабжённых вычислительными модулями: двух узкоугольных и двух широкоугольных. Для отработки всех перечисленных приборов использовались специальные стенды,

генерирующие изображения объектов наблюдения для каждого из них и имитирующие динамику полёта (Аванесов и др., 2010). К сожалению, из-за аварии КА испытать эти приборы в полёте так и не удалось.

Начиная с 90-х гг. прошлого века в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) накопился большой и весьма положительный опыт создания и практического использования стендов для отработки звёздных датчиков ориентации КА (Аванесов и др., 2003). В настоящее время с учётом накопленного опыта и перспективных планов полётов отечественных КА к Луне в ИКИ РАН создаётся система автономной оптической навигации для работы в припланетной области космического пространства (Аванесов и др., 2020) и стенд для её наземной отработки.

В основе разрабатываемой системы автономной припланетной навигации лежат синхронные, привязанные к абсолютному времени UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) измерения направлений на звёзды небесной сферы, на горизонты Луны, Земли, а также на объекты лунной/земной поверхности с заранее известными координатами (контрольные точки — КТ). Измерения направлений на звёзды выполняются с помощью звёздных датчиков ориентации, направления на линию горизонта планеты и на элементы её поверхности — с помощью широкоугольной и узкоугольной навигационных камер (ШНК и УНК). Таким образом, по составу технических средств разрабатываемая в ИКИ РАН система автономной навигации КА в припланетной области космического пространства практически не отличается от той, что использовалась в проекте «Фобос-Грунт». Значительные отличия вновь создаваемой системы от её прототипа заключаются в использовании в ней более современных приборов, в их ключевых параметрах, а также в конструктивном исполнении и компоновке на борту КА.

Конструктивные отличия современных приборов от их прототипов заключаются в том, что съёмочные камеры и звёздные датчики выполнены в виде выносных оптических головок. Входящие в их состав модули процессоров вынесены в отдельный блок обработки данных (БОД). Это позволило разместить все оптические головки на одном кронштейне, что должно заметно облегчить взаимную выставку осей всех камер.

В состав системы входят четыре измерительные камеры:

- два звёздных датчика (ЗД), предназначенные для определения ориентации КА, в составе двух оптических головок (ОГ-ЗД) и двух модулей обработки данных;
- одна узкоугольная навигационная камера (УНК) для наблюдения и распознавания объектов поверхности планет в составе оптической головки (ОГ-УНК) и модуля процессора;
- одна широкоугольная навигационная камера (ШНК) для наблюдения и распознавания горизонта и объектов поверхности планет в составе оптической головки (ОГ-ШНК) и модуля процессора.

Основные параметры оптических головок приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Основные параметры оптических головок навигационной системы

Камера	ОГ-ШНК	ОГ-УНК	ОГ-ЗД (2 шт.)
Фокусное расстояние, мм	3,6	23	36
Размер кадра, пиксель	2048×2048		
Угловое разрешение δ , угл. с	316	49,3	31,5
Поле обзора, угл. град	180	27,5	17,8
Спектральная зона, мкм	0,8–0,9	0,8–0,9	0,5–0,9

Звёздные датчики и камеры образуют единое координатное пространство. Измерения параметров ориентации по звёздам небесной сферы выполняются в инерциальной системе

координат ICRS (*англ.* International Celestial Reference System) с использованием бортового звёздного каталога. Измерения направлений на горизонт планеты и на КТ ведутся в связанной с поверхностью планеты вращающейся планетоцентрической системе координат (ПЦСК): ITRS (*англ.* International Terrestrial Reference System) — для Земли и Moon_ME — для Луны.

Для распознавания КТ на поверхности Луны на основе её модели создан специальный каталог. КТ более или менее равномерно распределены по поверхности планеты. Среднее расстояние между КТ составляет около 30 км. Аналогичный каталог КТ создан по результатам космических съёмок и для объектов земной поверхности. В настоящее время он используется в экспериментальных целях для геопривязки материалов космической съёмки Земли, получаемых многозональной съёмочной системой, разработанной в ИКИ РАН и эксплуатируемой на КА серии «Метеор-М» (Жуков и др., 2018).

Связь между планетоцентрической и инерциальной системами координат осуществляется на основании привязки измерений к UTC, что позволяет пересчитывать полученные измерения в координаты подспутниковой точки на планете, в положение центра масс КА на орбите, а также определять его ориентацию в инерциальном пространстве.

В соответствии с заложенными в навигационную систему принципами задача создаваемого стенда состоит в том, чтобы по возможности точно воспроизвести условия наблюдения звёзд, Луны и Земли с борта КА на околопланетных орбитах и на орбите перелёта от одной планеты к другой, исходя из того, что все происходящие в это время события разворачиваются во времени. Для этого стенд должен синхронно во времени генерировать изображения звёзд небесной сферы, а также изображения Земли и Луны таким образом, чтобы приборы навигационной системы в каждый момент времени могли «видеть» их так, как это будет происходить на борту КА в реальном полёте. В этом состоит задача стенда и в этом заключается его новизна по отношению к предыдущим проектам, где отработка каждого бортового прибора шла по отдельности от других.

Укрупнённая структура стенда, получившего название «Стенд для отработки технологии припланетной навигации», показана на *рис. 1* (см. с. 111). Стенд состоит из нескольких компьютеров и средств отображения, на которых с помощью специально разработанной программы «Генерация» воспроизводится изображение звёзд, Земли и Луны в масштабе и ракурсах, соответствующих положению КА на трассе полёта.

В состав стенда включён также персональный компьютер (ПК), к которому через блок интерфейсов могут подключаться оптические головки ОГ-ЗД, ОГ-УНК и ОГ-ШНК непосредственно либо через БОД навигационной системы. В обоих случаях установленное в ПК или в БОД математическое обеспечение становится для остального оборудования стенда предметом тестирования.

Задаваемые программой «Генерация» параметры полёта сравниваются с измеренными приборами навигационной системы величинами с помощью программы «Арбитр». При этом сопоставляются углы ориентации КА и координаты КА в ПЦСК. Координаты КА выводятся как в виде декартовых координат КА, которые непосредственно используются при динамической фильтрации навигационных измерений при определении орбиты КА, так и для удобства в виде сферических координат: широты и долготы подспутниковой точки и высоты КА.

Таким образом, оборудование и программно-математическое обеспечение стенда позволяют не только моделировать условия наблюдения небесных тел, но и оценивать результаты работы приборов навигационной системы.

Оборудование стенда и приборы испытываемой системы используют в своей работе мировое время, но связаны между собой только через оптические каналы «экран — оптическая головка».

Программа «Генерация» содержит следующие основные программные модули:

- Калибровка;
- Орбита/ориентация;
- Генерация изображений звёзд;
- Генерация изображений планет.

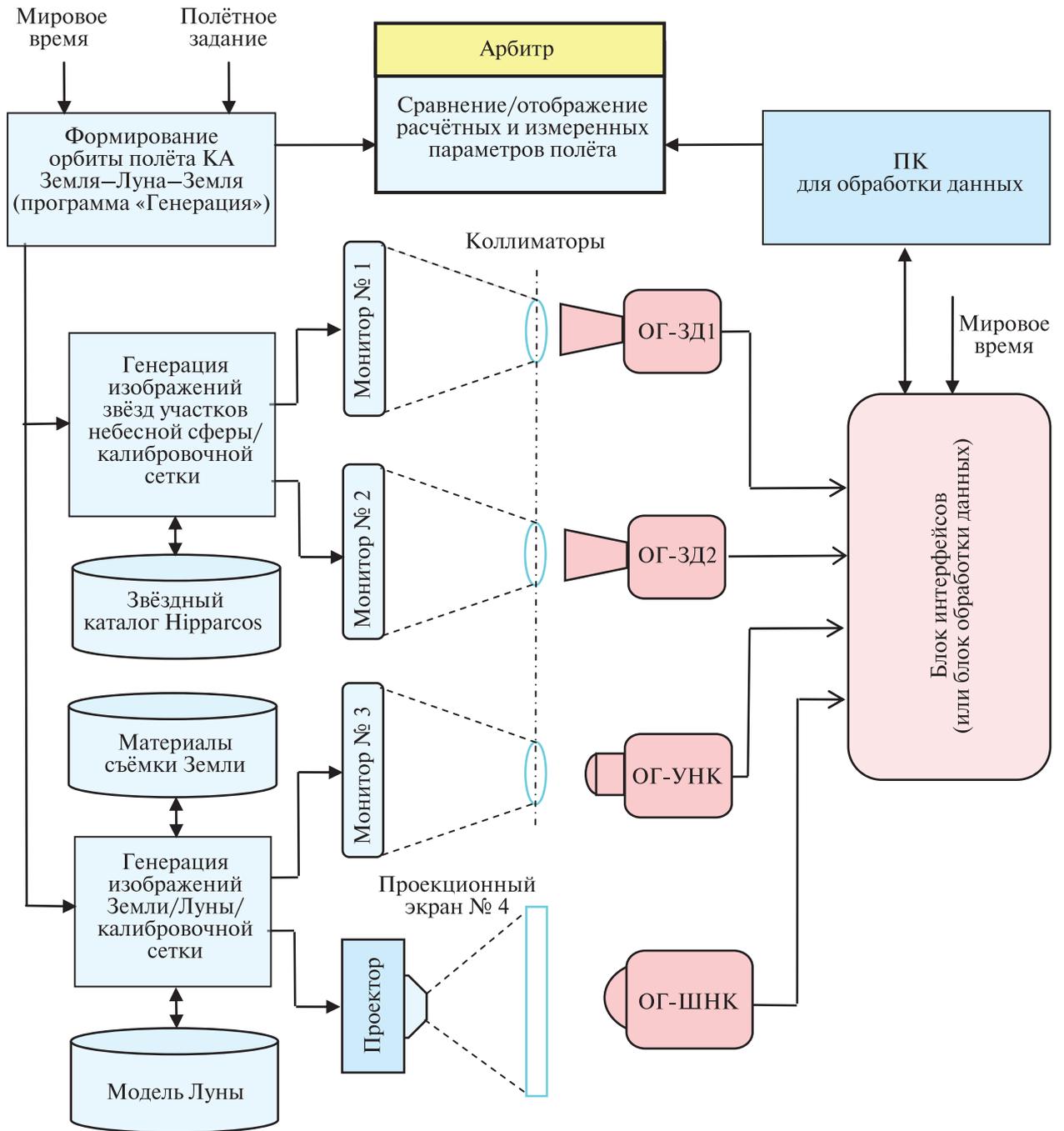


Рис. 1. Укрупнённая структура стенда для отработки технологии автономной припланетной навигации

Перед началом совместной работы стенда и приборов навигационной системы проводится выставка и калибровка взаимодействующих инструментов. Для этого программный модуль «Калибровка» содержит набор тестовых изображений, с помощью которых выполняется оценка частотно-контрастных характеристик всех четырёх систем «экран – камера», а также производится их юстировка. Тестовые изображения содержат градиционные клинья, вертикальные и горизонтальные линии, соответствующие различным пространственным частотам. По ним проводится подстройка фокусировки камер и подбор оптимального времени накопления полезного сигнала. Другая группа изображений содержит сетки регулярно расположенных точек, используемые для точной взаимной выставки каждой пары «экран – камера», а также для устранения обобщённой дисторсии.

Выявленные в процессе калибровки отклонения в измеренных параметрах протоколируются и в зависимости от их величины и значимости либо устраняются, либо учитываются в дальнейших расчётах.

В соответствии с полётным заданием программный модуль «Орбита/ориентация» для каждого заданного момента времени генерирует координаты КА на орбите и положение его системы координат по отношению к звёздам небесной сферы, а также координаты на ней визирных осей двух входящих в состав навигационной системы звёздных датчиков ориентации. Эти данные транслируются в программные модули «Генерация изображений звёзд» и «Генерация изображений планет».

Программный модуль «Генерация изображений звёзд» — модификация программы SkyViewer (Аванесов и др., 2021). В этом программном модуле по заданным координатам визирных осей определяется центр наблюдаемых звёздными датчиками в данный момент площадок на небесной сфере. Угловые размеры площадок определяются полем зрения приборов. Таким образом, создаётся адресная система для выборки групп звёзд из каталога Hipparcos. В существующем виде программа содержит набор из 12 звёздных каталогов. Один из них имеет расширенный список из 41 399 звёзд до 8,5 звёздной величины, выбранных из каталога Hipparcos. Остальные 11 представляют собой каталоги звёзд, набранные из расширенного списка для конкретных звёздных датчиков ориентации, разработанных в ИКИ РАН.

Изображения звёзд каждого участка небесной сферы формируются с учётом их звёздной величины и спектральной характеристики ОГ-ЗД. На изображения звёзд при необходимости могут накладываться шумы и помехи. Готовые изображения, соответствующие расположению оптических головок в инерциальном пространстве, выводятся на экраны мониторов № 1 и 2. Звёзды на экране монитора отображаются одним пикселем, угловой размер которого определяет величину пространственной дискретизации изображения. Затем «бортовое» время увеличивается на dt , и весь цикл повторяется. Таким образом, изображение участка небесной сферы предьявляется прибору дискретно по пространству и по времени.

Программный модуль «Генерация изображений планет» использует полученные от программного модуля «Орбита/ориентация» данные о координатах КА на орбите и его ориентации в инерциальном пространстве для вычисления положения по отношению к нему Солнца, Земли и Луны по их эфемеридам. Результатом этих вычислений становятся расчётные значения координат подспутниковых точек на поверхности планет и углов падения солнечных лучей на них. Эти данные используются в качестве адресной системы для обращения к банкам данных «Материалы съёмки Земли» и к «Модели Луны». Угловые размеры, масштаб и другие параметры генерируемых программой изображений выбираются в соответствии с характеристиками ОГ-УНК и ОГ-ШНК. Сформированные программой изображения выводятся на экран монитора № 3 и на проекционный экран № 4.

Для генерации изображений Земли используются материалы космической съёмки планеты, а также её топографическая модель SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata>). Изображения Луны генерируются на основе её топографических моделей, построенных по данным лазерного альтиметра LOLA (*англ.* Lunar Orbiter Laser Altimeter) на КА LRO (*англ.* Luna Reconnaissance Orbiter) (http://imbrium.mit.edu/BROWSE/LOLA_GDR).

Как уже упоминалось, сопряжение средств генерации изображений с оптическими головками навигационной системы производится через средства отображения на основе экранов мониторов и коллиматоров для ОГ-ЗД и ОГ-УНК. Для сопряжения с ОГ-ШНК используется проекционный экран. Вносимая пиксельной структурой экранов пространственная и временная дискретизация изображения ограничивает возможности использования выбранного способа моделирования для оценки точности координатных измерений, выполняемых испытываемыми приборами, но никак не мешает отработке их математического обеспечения и оценке функциональных возможностей.

На момент написания настоящей статьи оптические головки навигационной системы подключены к ПК обработки данных через блок интерфейсов. В ПК загружена актуальная на сегодняшний день версия математического обеспечения, имитирующая обработку дан-

ных камер навигационной системы и логику их взаимодействия. Идёт отладка приборов в статике.

В качестве примера работы стенда на *рис. 2* показан снимок участка небесной сферы, принятый к обработке ОГ-ЗД2 с экрана монитора № 2. Ниже в *табл. 2* приведены результаты сравнения заданных стендом и измеренных звёздным прибором параметров ориентации. Видно, что между заданными и измеренными параметрами ориентации, сопоставленными с помощью программы «Арбитр», есть незначительные отличия, что вполне естественно и допустимо.

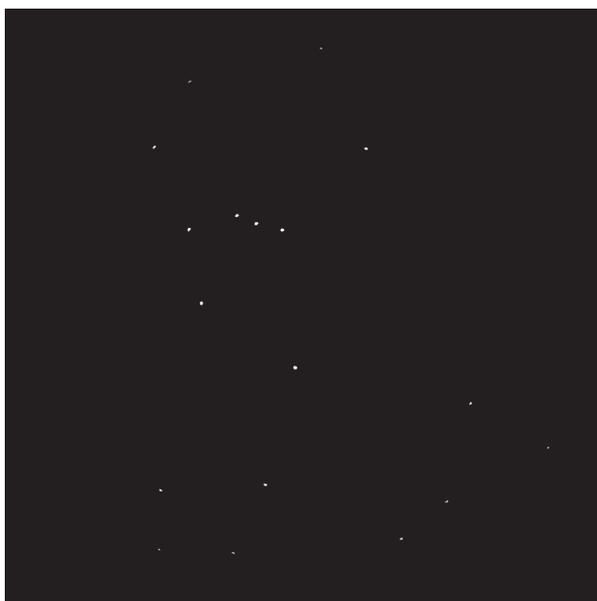


Рис. 2. Изображение участка небесной сферы, принятое ОГ-ЗД № 2 с экрана монитора

Таблица 2. Сравнение заданных стендом и измеренных приборами параметров ориентации

	Углы визирования		
	Прямое восхождение	Склонение	Азимут
Заданные стендом	56° 33' 54"	14° 28' 39"	26° 33' 54"
Измеренные прибором	56° 33' 51"	14° 28' 35"	26° 34' 33"

Из *рис. 2* видно, что принятое ОГ-ЗД2 изображение участка небесной сферы практически не отличается от снимков реального небосвода в хороших условиях.

Следующие примеры работы стенда и испытуемых приборов демонстрируют наблюдения горизонта Луны и объектов её поверхности с помощью ОГ-ШНК и ОГ-УНК.

На *рис. 3* (см. с. 114) приведены снимки, сгенерированные стендом и принятые с экрана мониторов № 3 и 4 приборами ОГ-ШНК и ОГ-УНК, а также результаты работы испытуемой системы.

На *рис. 3а* показано изображение, сгенерированное программой стенда и принятое ОГ-ШНК с высоты 400 км. На *рис. 3б* представлена выделенная математическим обеспечением ШНК линия горизонта. По ней с учётом синхронно полученных показаний звёздных датчиков рассчитаны и переданы в математическое обеспечение УНК координаты подспутниковой точки. Одновременно было получено изображение УНК, показанное на *рис. 3г*. Модуль процессора УНК, используя полученные координаты, обратился к своему банку контрольных точек. Проекция распознанных УНК контрольных точек показана на *рис. 3г* зелёными квадратами.

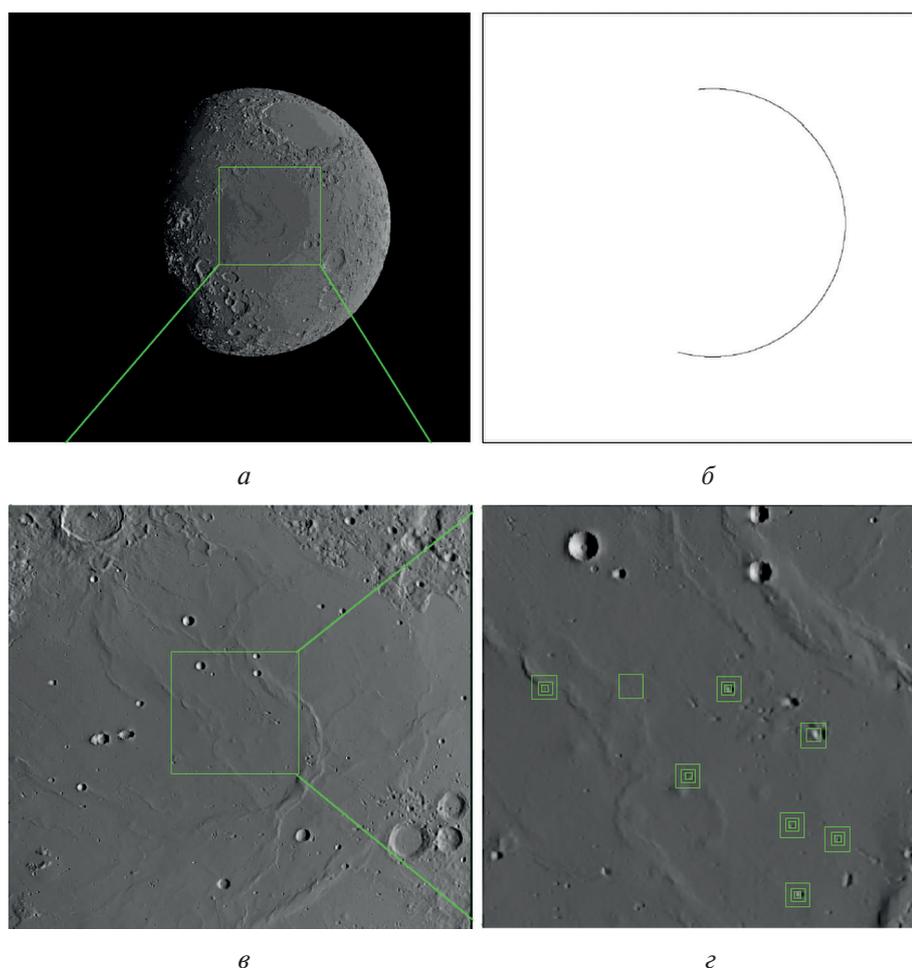


Рис. 3. Снимки, сгенерированные стендом: *а* — изображение диска Луны с высоты 400 км, принятое ОГ-ШНК с проекционного экрана № 4; *б* — линия горизонта Луны, выделенная программно-математическим обеспечением процессорного модуля; *в* — фрагмент изображения, полученного ОГ-ШНК, размером $90 \times 90^\circ$ (используется в качестве иллюстрации); *г* — изображение $27,5 \times 27,5^\circ$, принятое ОГ-УНК с экрана монитора № 3

На рис. 3а зелёным квадратом выделена часть поля зрения ШНК размером $90 \times 90^\circ$. Увеличенный фрагмент поля зрения ШНК приведён на рис. 3в. На нём зелёным квадратом показано поле зрения УНК. По расположению кратеров на рис. 3а, в и г можно судить, что УНК с высокой детальностью наблюдает тот же участок планеты, что и ШНК.

В табл. 3 для показанных на рис. 3 изображений Луны приведены результаты сравнения заданных стендом и измеренных приборами навигационной системы координат подспутниковой точки и высоты орбиты КА, выполненного программой «Арбитр». Для наглядности ошибки измерений приведены в метрах.

Приведённые ошибки соответствуют результатам модельных расчётов. Большие ошибки измерений по горизонту, проводящихся в приближении «круглой Луны», объясняются влиянием рельефа Луны, на которой перепад высот относительно референц-сферы достигает ± 10 км. Такая точность вполне приемлема в принятом алгоритме навигационных измерений, где навигация по горизонту используется лишь для грубого определения положения КА в целях сокращения области поиска контрольных точек в бортовом каталоге УНК. После этого переход на навигацию по контрольным точкам позволяет определить координаты подспутниковой точки по данным УНК с точностью в десятки метров. Ошибка определения высоты КА в сотни метров по данным УНК также ожидаема: она связана с относительно узким полем зрения УНК, следствием чего выступает недостаточная угловая засечка при определении высоты.

Таблица 3. Сравнение заданных стендом и измеренных приборами навигационной системы координат подспутниковой точки на лунной поверхности и высоты орбиты КА

	Широта подспутниковой точки	Долгота подспутниковой точки	Высота КА, м
Заданные стендом координаты	-1,42226°	51,05341°	400 000
Координаты, измеренные ШНК по горизонту	-1,21610°	51,24501°	399 208
Ошибка измерений ШНК	6252 м	5808 м	792
Координаты, измеренные УНК по контрольным точкам	-1,42207°	51,05515°	400 209
Ошибка измерений УНК	5,8 м	52,7 м	209,2

Возможности проектируемой навигационной системы и стенда для её отработки ограничиваются разрешающей способностью модели LOLA, используемой для выбора контрольных точек. Вместе с тем имеющиеся на борту навигационные приборы пригодны для работы и на малых высотах, включая посадку. Чтобы реализовать такую возможность, необходимо дополнить модели Луны LOLA описанием района посадки в виде моделей более высокого разрешения, например построенных по данным узкоугольной телевизионной камеры NAC (*англ.* Narrow Angle Camera) на КА LRO (http://wms.lroc.asu.edu/lroc/rdr_product_select), либо использовать непосредственно материалы съёмки района посадки с высоким пространственным разрешением. По ним можно было бы выбрать новые КТ, которые будут включены в бортовые каталоги ШНК и УНК.

Навигация по горизонтам планет и по контрольным точкам на их поверхности носит абсолютный характер. Абсолютная навигация необходима, чтобы точно вывести КА в заданный район на выбранное заранее место посадки. Вместе с тем посадка КА на поверхность планеты всегда содержит элементы непредсказуемости. При этом очень важно, чтобы КА, начиная с некоторой высоты, обладал способностью к самостоятельным действиям сообразно со сложившейся ситуацией. Например, в процессе снижения при ближайшем рассмотрении телевизионные средства КА могут обнаружить на запланированном месте посадки какое-то препятствие. В таком случае КА должен быть способен выполнить самостоятельный манёвр для ухода от препятствия. Такая возможность предусматривалась в ТСНН в несостоявшемся в 2011 г. полёте КА «Фобос-Грунт» (Аванесов и др., 2010). В этом проекте телевизионные средства на этапе снижения формировали «карту риска» района посадки и указывали направление увода спускаемого аппарата. Такой режим полёта также будет отрабатываться с помощью средств создаваемого стенда.

Завершая описание стенда для отработки технологии припланетной навигации, следует отметить, что уже полученные результаты подтверждают правильность выбранной концепции его построения. На этом основании можно предположить, что стенд не только станет важным инструментом для отработки технологии припланетной навигации, но и будет активно использоваться для исследований и испытаний новых алгоритмов, программ и приборов, предназначенных для решения задач сближения и посадки на планеты и малые тела Солнечной системы.

Литература

1. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Фори А.А. Стенд для динамических испытаний и геометрической калибровки астронавигационных приборов // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 74–79.
2. 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., Фори А.А. Телевизионная система навигации и наблюдения // *Астрономический вестн.* 2010. Т. 4. № 5. С. 473–479.

3. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С., Михайлов М.В. Отработка технологии автономной навигации КА дальнего космоса на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 41–49. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49.
4. Аванесов Г.А., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Моделирование изображений звездного неба в задачах наземной отработки датчиков ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 82–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94.
5. 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. 201–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212.
6. Телевизионная съемка кометы Галлея / под ред. Сагдеева Р.З. М.: Наука, 1983. 292 с.
7. Телевизионные исследования Фобоса / под ред. Аванесова Г.А. М.: Наука, 1994. 198 с.
8. Bhaskaran S. Autonomous Navigation for Deep Space Missions // SpaceOps 2012 Conf. Stockholm. Sweden, 11–15 June. 2012. DOI: 10.2514/6.2012-1267135.
9. Kubota T., Sawai S., Misu T., Hashimoto T., Kawaguchi J., Fujiwara A. Autonomous landing system for MUSES-C Sample Return Mission // Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: Proc. 5th Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. 1–3 June 1999, Noordwijk, the Netherland / ed. M. Perry. 1999. pp. 615–620.

Stand for testing the technology of autonomous near-planet navigation

G. A. Avanesov, B. S. Zhukov, P. S. Smetanin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Approaching the planets and small bodies of the solar system, as well as landing on them, require the use of methods and means of autonomous navigation of spacecraft. The stand being developed at the IKI RAN is designed to simulate the conditions for observing stars, the Earth and the Moon by television cameras that are part of the autonomous near-planet navigation system on the Earth–Moon–Earth flight path. The stand consists of several computers and displays, on which, with the help of a specially developed Generation program, images of stars, the Earth and the Moon are reproduced in scale and aspect corresponding to the position of the spacecraft on the flight path. The facilities of the stand make it possible to simulate the observation conditions of both planets in all flight phases, including landing on the lunar surface. The Hipparcos catalog of stars, LOLA topographic models of the Moon, as well as space imagery of the Earth are used to form images. The stand includes the means of processing data obtained by the devices of the autonomous optical navigation system, as well as Arbiter program, which makes it possible to evaluate the accuracy of navigation measurements by comparing the parameters set by the stand and measured by the navigation system. Examples of images obtained at the stand and the results of navigation measurements performed on them using the planet's horizon and control points on its surface are given.

Keywords: star catalogue, ground control points, horizon, orientation, optical navigation, star tracker, mathematical model, inertial space

Accepted: 28.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117

References

1. Avanesov G. A., Voronkov S. V., Forsh A. A., Bench for dynamic tests and geometrical calibration of astro-navigational devices, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 74–79 (in Russian).

2. 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., TV system for navigation and guidance, *Astronomicheskii vestnik*, 2010, Vol. 44, No. 5, pp. 444–450.
3. Avanesov G. A., Zhukov B. S., Smetanin P. C., Mikhailov M. V., Testing the technology of deep space spacecraft autonomous navigation at the International Space Station, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 41–49 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49.
4. Avanesov G. A., Shamis V. A., Elyashev Ya. D., Modeling of images of the starry sky in problems of ground testing of orientation sensors, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 82–94 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94.
5. Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kondratieva T. V., Nikitin A. V., 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. 201–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212.
6. *Televizionnaya s'emka komety Galleya* (TV surveying of comet Halley), Moscow: Nauka, 1983, 292 p. (in Russian).
7. *Televizionnye issledovaniya Fobosa* (Television investigations of Phobos), Moscow: Nauka, 1994, 198 p. (in Russian).
8. Bhaskaran S., Autonomous Navigation for Deep Space Missions, *SpaceOps 2012 Conf.*, Stockholm, Sweden, 11–15 June, 2012, DOI: 10.2514/6.2012-1267135.
9. Kubota T., Sawai S., Misu T., Hashimoto T., Kawaguchi J., Fujiwara A., Autonomous landing system for MUSES-C Sample Return Mission, *Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Proc. 5th Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 1–3 June, 1999, Noordwijk, the Netherland, M. Perry (ed.), 1999, pp. 615–620.