АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2021, том 55, № 6, с. 601–617

УДК 523

СЛУЖЕБНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА КА ЛУНА-25

© 2021 г. Г. А. Аванесов[a], А. В. Бережков[a], Р. В. Бессонов[a], С. В. Воронков[a], Б. С. Жуков[a], А. Э. Зубарев[b], М. И. Куделин[a], А. В. Никитин[a], И. В. Полянский[a, *], А. А. Форш[a], Я. Д. Эльяшев[a]

[a] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

[b] *Московский государственные университет геодезии и картографии, Москва, Россия*

***** *E-mail: ivpolyan@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.
После доработки 23.11.2020 г.
Принята к публикации 15.03.2021 г.

В рамках создания космических аппаратов миссий Луна-25 и Луна-27 разработана телевизионная система СТС-Л, предназначенная для получения одиночных или серийных изображений с высокой детальностью в круговой зоне обзора. СТС-Л включает в себя восемь цифровых камер на фоточувствительных КМОП сенсорах и вычислительный блок, совмещенный с долговременным хранилищем данных. Поскольку работа КА предусматривается в районе Луны, в котором до сих пор не проводились исследования, полученные снимки позволят рассчитывать на новые данные о структуре и составе поверхности, спектральным и морфологическим свойствам реголита. В программе работы системы предусмотрены несколько основных режимов – видеосъемка поверхности Луны на этапе основного торможения КА, съемка полнокруговых панорам в ходе снижения и посадки КА и во время работы на поверхности, стереоскопическая съемка участка забора грунта для построения трехмерной модели участка поверхности, на котором производится забор грунта. С целью решения задачи регистрации высококонтрастных сцен на поверхности Луны в СТС-Л предусмотрен метод многоэкспозиционного формирования изображений с расширенным динамическим диапазоном. В работе приведено описание взаимодействия с манипуляторным комплексом и методика автоматизированного формирования замкнутых панорам.

Ключевые слова: телевизионная съемочная система, космическая цифровая камера, HDR, безопасная посадка на Луну

DOI: 10.31857/S0320930X21060013

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи получения визуальных изображений является практически обязательным для любой космической миссии, связанной с исследованием поверхности планет и других небесных тел с помощью автоматических посадочных станций. Начиная с первых лунных миссий проекта Е-6, посадочные аппараты космических станций оснащались сканирующими панорамными телефотометрами для съемки поверхности и окружающих предметов. Телевизионная камера Луны-9 – первого успешного аппарата, совершившего мягкую посадку на поверхность Луны, представляла собой оптико-механическое сканирующее устройство, где формирование изображения производилось за счет качания по вертикали и медленного вращения поля зрения одноэлементного ФЭУ в горизонтальной плоскости (Marov, Huntress, 2013).

Существенным толчком к дальнейшему развитию съемочных средств стала разработка самоходного аппарата Луноход-1, где помимо сканирующих устройств, была впервые установлена малокадровая телевизионная система на основе видикона с регулируемой памятью (ВРП). Полученное при короткой экспозиции изображение запоминалось на мишени видикона и медленно считывалось в темпе доступном для передачи по каналу связи. На приемной стороне изображение воспроизводилось построчно на экране кинескопа, накапливалось с помощью ВРП, а затем многократно считывалось с него с частотой, принятой в вещательном телевидении (Avanesov и др., 1969).

Со временем, по мере появления и развития многоэлементных фотоэлектрических преобразователей, задача получения и передачи на Землю изображений расширилась до целого спектра применений, связанных с регистрацией оптического излучения в видимом диапазоне электромагнитных волн – от многозональной и стереосъемки до видеоспектрометрии.

1. На сегодняшний день телевизионные средства входят в состав бортовой аппаратуры всех существующих и планируемых автоматических стационарных посадочных аппаратов и планетоходов. Наиболее отработанными, безусловно, являются телевизионные системы, устанавливаемые на марсоходах американского космического агентства NASA, поскольку за последние 20 лет эти автономные исследовательские средства отправлялись и успешно работали на поверхности планеты Марс (Matijevic и др., 1997).

На стационарных посадочных платформах планетных миссий Чанъэ-3 и -4 (CNSA) (Yingzhuo Jia, Yongliao Zou, Jinsong Ping, Changbin Xue, Jun Yan, Yuanming Ning, 2018), InSight Lander (NASA) (Maki и др., 2003), ExoMars-2022 (ESA/Роскосмос) (Zelenyi и др., 2015) также предусмотрены средства телевизионного наблюдения.

В ИКИ РАН разработка съемочных систем ведется, начиная с основания института, включая проект Вега 1984–1986 гг. (Аванесов и др., 1989) и проект Фобос (Аванесов и др., 1994). Для проекта Фобос–Грунт была разработана телевизионная система навигации и наблюдения ТСНН (Аванесов и др., 2008), дальнейшим развитием которой является служебная телевизионная система или сокращенно СТС-Л, предназначенная для установки и эксплуатации на посадочных модулях отечественных миссий Луна-25 и Луна-27.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Аппаратура СТС-Л предназначена для формирования цифровых изображений окружающей обстановки и объектов, находящихся в пределах поля зрения камер во время посадки КА на поверхность Луны и для съемок на поверхности – обзорных (панорамных) съемок и стереосъемки зоны работы манипулятора. Регистрация изображений производится в трех зонах видимой области электромагнитного спектра, позволяющих синтезировать цветное изображение наблюдаемого участка поверхности Луны.

Посадка КА Луна-25 и работа научной аппаратуры будет осуществлен в районе Луны, в котором до сих пор не проводились исследования, поэтому телевизионная съемка, прежде всего позволит увидеть окружающий ландшафт, а также получить данные о морфологии и цвете грунта на поверхности, что в сочетании с данными других экспериментов может дать новую информацию для его исследования.

Известно, что в видимом диапазоне спектра на поверхности Луны, в целом, отсутствуют существенные цветовые контрасты, однако возможны локальные цветовые отличия. Так, образцы лунного грунта 15401 и 74220, полученные в рамках миссий Apollo-15 и Apollo-17, имели цветовой оттенок и при детальном исследовании в них были обнаружены стеклянные частицы зеленого и оранжевого цвета (см. рис. 1), которые, как считается, являются привнесенным веществом и имеют вулканическое происхождение (Tompkins, Carlé, 2010). В ходе проведения научных исследований на поверхности Луны, при определении участков для спектрального анализа или забора грунта, наличие цветового оттенка поможет в определении приоритетов научного интереса.

Оценка спектральных отражательных свойств лунной поверхности будет производится по изображениям, полученным в трех спектральных диапазонах с максимумами чувствительности на длинах волн 0.47 (синий), 0.54 (зеленый) и 0.62 (красный) мкм. Спектральная избирательность обеспечивается цветным матричным фильтром Байера, входящим в состав фоточувствительной КМОП матрицы. Спектральные характеристики цветных фильтров и их конфигурация показаны на рис. 6.

Детальность изображений участка поверхности, где будут производиться заборы грунта, определяется угловым полем зрения камер и количеством элементарных детекторов фоточувствительной матрицы. Чтобы обеспечить полное покрытие рабочей зоны манипулятора необходимо использовать две идентичные камеры, поле обзора которых составляет 55° при высоте установки ~2.5 м от поверхности. На рис. 10 и 12 показана установка стереокамер КАМ-С и зона их основного интереса – участок поверхности, откуда будет производиться забор грунта манипулятором. При использовании фоточувствительного сенсора размером 2048 × 2048 элементов обеспечивается угловое разрешение ~0.00045 рад. С расстояния установки при указанном угловом разрешении линейное пространственное разрешение в зоне работы манипулятора будет изменяться от 1 до 3.5 мм (см. рис. 2), что, с учетом специфики пространственной конфигурации Байеровского фильтра, позволит различать локальные контрастные объекты размером два мм и более.

Отдельным классом задач, которые должны решаться системой СТС-Л, является визуальная поддержка работы лунного манипуляторного комплекса (ЛМК). Для обеспечения точности наведения манипулятора необходимо произвести построение трехмерной топографической модели участка поверхности, с которого планируются заборы грунта, а также получить детальные изображения грунта для проведения морфологического анализа его структуры. Анализ изображений поверхности поможет в выборе участков для забора образцов грунта, а трехмерная модель позволит точно рассчитать траекторию движения манипулятора.

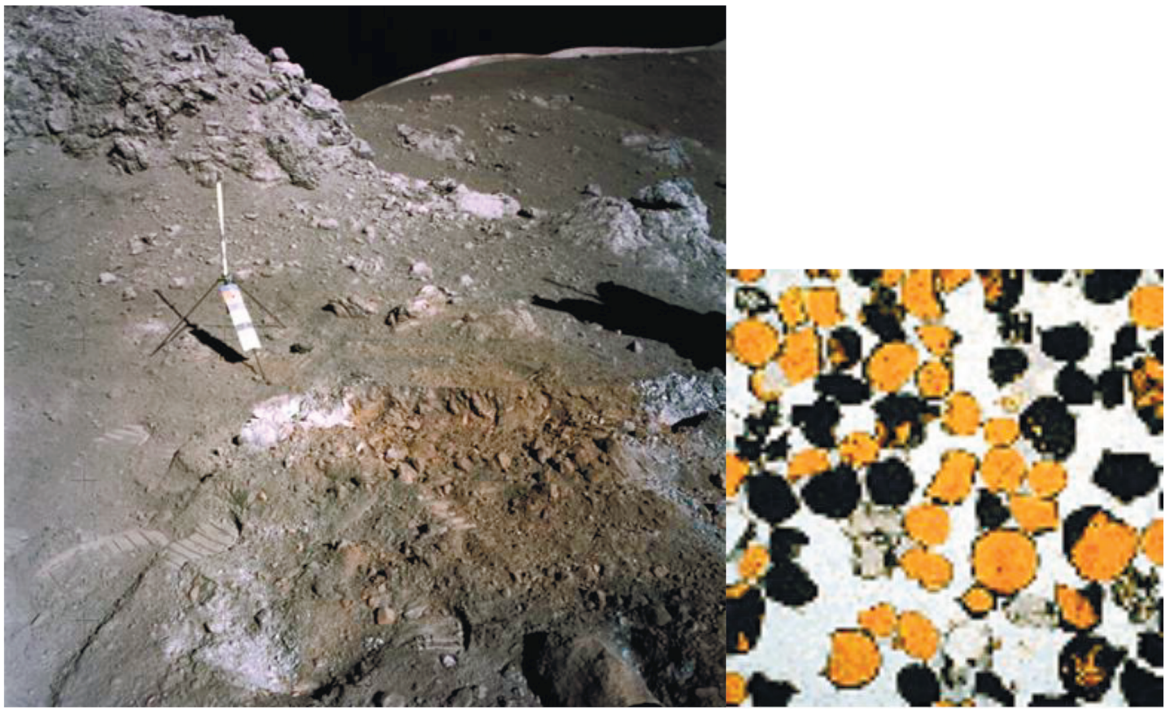


Рис. 1. Фотография с места посадки КА Apollo-17 с оранжевым грунтом (слева) и его снимки под микроскопом (справа). (Credit: Apollo 17 Crew, NASA; http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/hires/a17_h_137_20990.gif, https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_17/images/sample1.gif, Graham Ryder, Lunar and Planetary Institute).

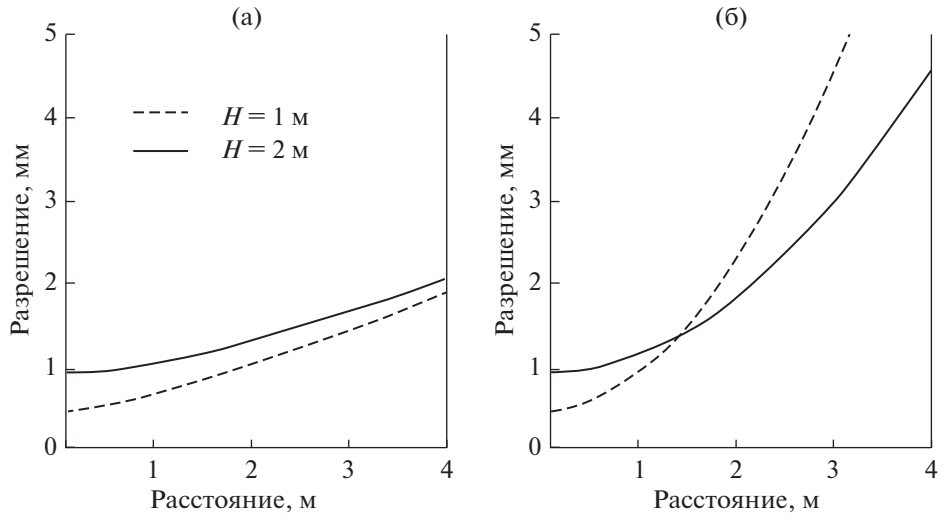


Рис. 2. Изменение пространственного разрешения стереокамер в зоне работы манипулятора в зависимости от расстояния: (а) – поперек плоскости наблюдения; (б) – в плоскости наблюдения.

Построение 3D модели поверхности производится на Земле по стереопаре снимков, сделанных камерами, установленными на приборной панели КА, там же производится привязка модели к системам координат камер и манипулятора, что позволяет производить измерения и рассчитывать число шагов исполнительных двигателей приводов ЛМК.

Не менее важной задачей является контроль процесса выгрузки образцов грунтозаборным устройством (ГЗУ). Размер воронки приемного отверстия масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР состав-

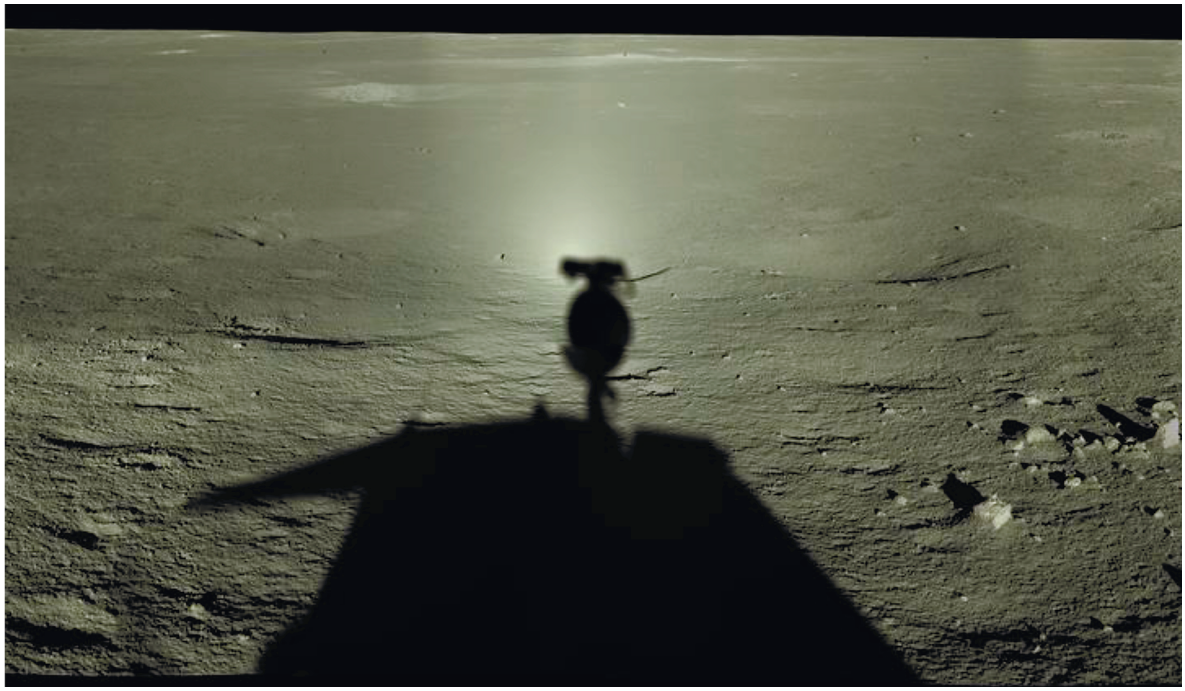


Рис. 3. Фрагмент панорамы, полученной с камеры PCAM ровера Yutu-2 миссии Chang'e 4 (Источник: CNSA/CLEP).

ляет всего три см и без визуальной поддержки обеспечить требуемую точность выхода ГЗУ достаточно проблематично.

Объективной технической сложностью получения качественных изображений лунной поверхности является большой динамический диапазон яркостей наблюдаемой сцены, обусловленный одновременным присутствием в поле зрения камеры участков поверхности, находящихся на одной линии с осью наблюдения и Солнцем и имеющих максимальную яркость вследствие характерной индикатрисы рассеяния света на поверхности реголита (Lumme, Bowell, 1980) и затененных участков, освещенность на которых в условиях отсутствия атмосферы практически отсутствует и формируется лишь за счет переотраженного излучения от других объектов на поверхности Луны и света от звезд.

Эту особенность хорошо иллюстрирует приведенный на рис. 3 фрагмент панорамы, сделанный с китайского лунного ровера Yutu-2 миссии Chang'e 4 на поверхности Луны. Около верхней границы тени от снимающей камеры, где фазовые углы малы, поверхность кажется очень яркой, хотя ее структура и альбедо, скорее всего, аналогичны характеристикам участков в соседних частях снимка, которые наблюдаются под большими фазовыми углами и поэтому имеют на изображении хорошо выраженную текстуру и значительно меньшую яркость. Фазовым называется угол между направлением оптической оси или линии наблюдения и направлением от наблюдаемой точки на источник освещения. Одновременно следует отметить, что в затененных областях снимка информация практически отсутствует.

Методом, выбранным для решения проблемы в системе СТС-Л является программная реализация последовательной регистрации нескольких кадров одной и той же сцены с различными временами накопления оптического излучения и последующего синтеза изображения с искусственно расширенным динамическим диапазоном (в англоязычной литературе high dynamic range – HDR). Экспериментально показано, что при использовании 10 экспозиций, полный динамический диапазон измеряемых яркостей будет составлять до ~10^4 (Эльяшев и др., 2014). Подробное описание данного метода приводится в соответствующем разделе настоящей статьи.

Достаточно интересным научным экспериментом является наблюдение рассеяние света в приповерхностном слое пыли. Атмосфера на Луне отсутствует, однако по современным представлениям вблизи поверхности находится тонкий слой левитирующей пыли, образующий "пылевую экзосферу Луны". Частицы пыли могут заряжаться фотоэлектронами, выбиваемыми из лунной поверхности под воздействием солнечного ветра, солнечных космических лучей, ультрафиолетового излучения Солнца, и подниматься под воздействием образующегося у поверхности электрического поля до высот от нескольких метров

до километров над поверхностью Луны (Stubbs и др., 2006).

Свечение пыли наблюдается как узкая яркая полоса над горизонтом Луны после или перед восходом Солнца (см. рис. 4). Она появляется на фоне менее протяженного по горизонтали зодиакального света, образующегося в результате рассеяния солнечных лучей на межпланетной пыли.

Типичные угловые размеры свечения горизонта – ~5° по горизонтали и ~0.1° по вертикали. Максимальная наблюдавшаяся яркость свечения горизонта составляет ~3000 кд/м^2. Она регистрируется сразу после захода Солнца и уменьшается примерно в два раза в течение первого часа, а затем резко – почти на два порядка – спадает в течение следующего часа. Ожидаемые размеры эффекта свечения определяют требования к угловому разрешению панорамных съемок – для однозначного детектирования элемент разрешения обзорных камер должен составлять не более 1/3 от минимального размера, т.е. 2–3 угл. мин.

Новые количественные исследования левитации лунной пыли представляют интерес для изучения механизмов переноса вещества по лунной поверхности, а также имеют важное значение для анализа условий функционирования посадочных модулей и луноходов (Захаров и др., 2012).

Полный перечень задач, которые планируется решать с помощью аппаратуры СТС-Л в рамках миссии Луна-25, можно условно разделить на технические и научные.

А) Технические задачи:

– проведение панорамной видеосъемки и съемки поверхности на участках подлета, снижения и посадки КА;

– получение цветных снимков поверхности Луны в районе посадки;

– координатное и картографическое обеспечение работы манипуляторного комплекса;

– визуальный контроль движения манипулятора, забора и выгрузки грунта;

– визуальный мониторинг обстановки в пределах 360° вокруг КА.

Б) Научные задачи:

– изучение структурных и спектральных свойств поверхностного грунта;

– построение связанной с системой координат КА трехмерной модели рельефа участка поверхности, где производится забот образцов лунного грунта;

– изучение пылевых явлений;

– проведение съемки и построение карты неоднородности подстилающей поверхности Луны на участке основного торможения и места посадки КА для отработки алгоритмов автономного выбора места посадки КА в будущих лунных миссиях.

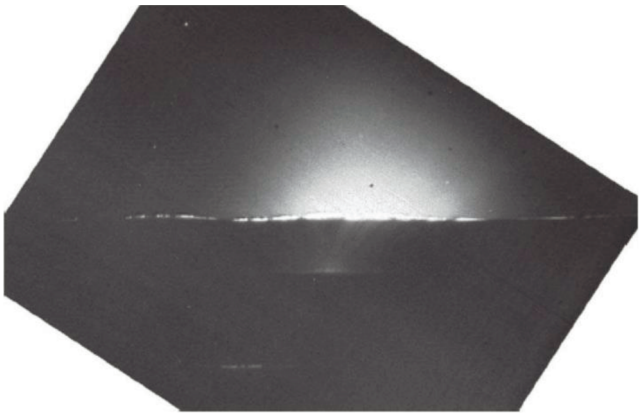


Рис. 4. Снимок лунного горизонта после захода Солнца, полученный с посадочного аппарата Surveyor-6. Свечение горизонта – узкая яркая полоса вдоль горизонта, наблюдаемая на фоне зодиакального света (Cowell и др., 2009).

СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТС-Л

В состав СТС-Л входят восемь моноблочных оптико-электронных цифровых телевизионных камер: четыре широкоугольных КАМ-О и четыре узкоугольных КАМ-С, один резервированный блок сбора и обработки данных БСД и кабельная сеть, объединяющая все приборы в единую систему. На рис. 5 приведено фото внешнего вида блоков СТС-Л, а на рис. 8 – блок-схема системы.

Цифровые камеры унифицированы между собой и отличаются только установленными объективами – угловое поле зрения обзорных камер составляет 115° × 115°, стерео и посадочных 55° × 55°. Во всех камерах установлены цветные RGB КМОП сенсоры, а спектральное пропускание оптической системы сформировано полосовым пропускающим фильтром в пределах полосы 0.40...0.67 мкм. Измеренная при наземной калибровке относительная спектральная чувствительность камер СТС-Л и конфигурация установленного в матрице цветного фильтра Байера приведены на рис. 6.

В состав камеры входят следующие основные элементы (см. рис. 7):

– цельнометаллический магниевый корпус (*1*);

– светозащитная бленда (*2*);

– объектив (*3*);

– плата видеотракта с фоточувствительной КМОП матрицей (*5*);

– плата контроллера с памятью (*6*);

– соединители (*7*).

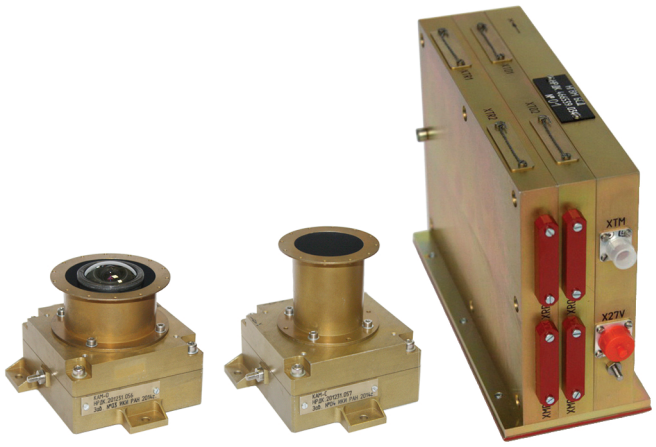


Рис. 5. Внешний вид прибора СТС-Л – камеры КАМ-О (а), КАМ-С (б) и блок БСД (в).

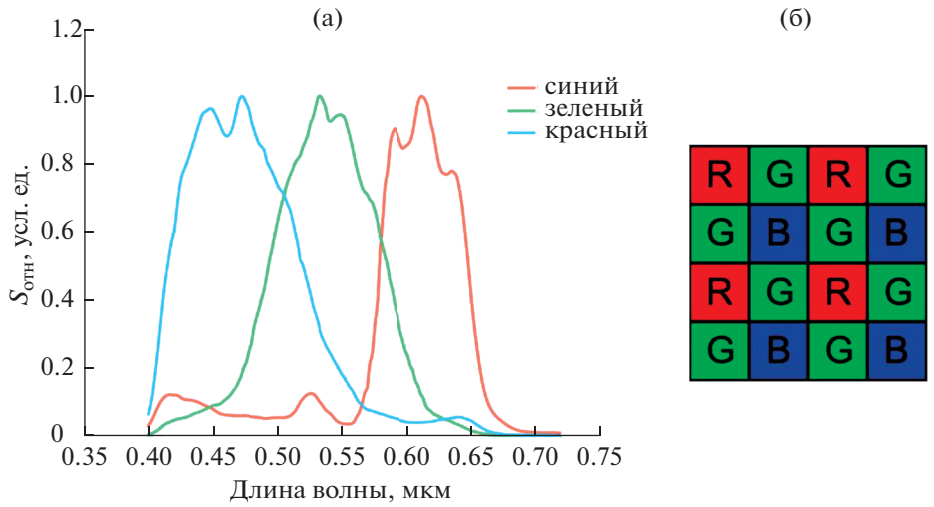


Рис. 6. Относительная спектральная чувствительность камеры КАМ-С (а); типичная структура цветного фильтра Байера (б).

На рис. 8 представлена функциональная схема камеры, поясняющая работу прибора.

Бленда предназначена для подавления боковой засветки от источников, находящихся вне угла поля зрения объектива.

Объектив формирует изображение наблюдаемого объекта в плоскости размещения фоточувствительных элементов КМОП матрицы. С целью сохранения стабильного положения фоточувствительных элементов относительно оптической оси и плоскости фокусировки объектива, плата с микросхемой КМОП матрицы жестко устанавливается в корпусе, к которому крепится посадочный фланец объектива.

Конструктивный узел, объединяющий бленду, объектив и плату с матрицей обеспечивает не только необходимое качество оптического изображения, но и его сохранение в условиях меняющихся внешних воздействий в течение срока службы камеры.

В качестве фоточувствительного элемента используется КМОП матрица размером 2048 × 2048 элементов размером 5.5 × 5.5 мкм. Сенсор является высоко интегрированным микроэлектронным прибором, предназначенным для регистрации оптического изображения, преобразования его в цифровой вид и передачи его в виде последовательного потока данных в блок сбора данных (БСД).

БСД представляет собой резервированный (основной и резервный полукомплекты) процессорный модуль, который управляет работой восьми камер, получает и сохраняет изображения, а также проводит их последующую обработку. Кро-

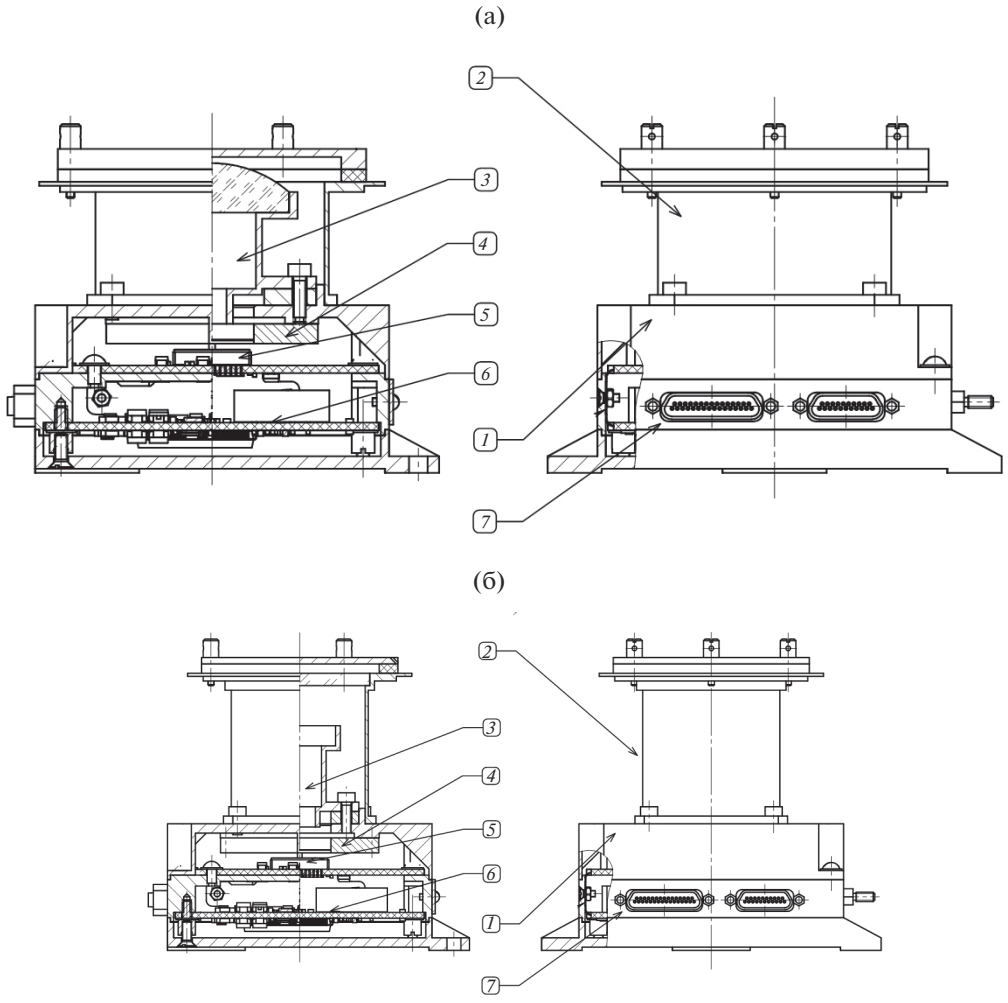


Рис. 7. Внешний вид и составные части камер КАМ-О (а) и КАМ-С (б).

ме операций с целевой информацией БСД осуществляет сбор и передачу телеметрической и диагностической информации, контроль и управление хранением данных, а также информационный обмен с бортовым комплексом управления (БКУ) по магистральному последовательному интерфейсу. Изображения сохраняются в энергонезависимой памяти БСД суммарным объемом 24 Гбита с целью последующей передачи в бортовую радиопередающую систему РУПНИ. Для связи с внешними системами КА в СТС-Л предусмотрены несколько интерфейсов (см. рис. 9):

– магистральный последовательный интерфейс командного обмена, выполненный по ГОСТ Р 52070-2003 (MIL-1553B);

– высокоскоростной последовательный интерфейс передачи данных в аппаратуру РУПНИ, выполненный по электрическому стандарту LVDS;

– интерфейс аналоговой телеметрии;

– интерфейс питания от бортовой сети 27В.

Телевизионные камеры на космическом аппарате установлены так, чтобы обеспечить решение целевых задач панорамной и стереосъемки с учетом ограничений по компоновке КА и особенностей его конструкции (см. рис. 10). Камеры КАМ-О установлены на четырех сторонах верхнего пояса приборного модуля КА, сориентированные по азимутам 0°, 90°, 180° и 270°, чтобы суммарное поле зрения образовывало неразрывную панораму по линии горизонта. Камеры, направленные на азимуты 0° и 180°, установлены под радиатором системы обеспечения теплового режима (СОТР), а две другие – на кронштейнах по углам солнечных панелей, что привело к разности высот относительно базовой поверхности и создало дополнительные сложности при формировании замкнутой панорамы.

Две камеры КАМ-С, образующие стереопару, установлены на тепловой сотовой панели (ТСП) на едином кронштейне, обеспечивая наблюдение

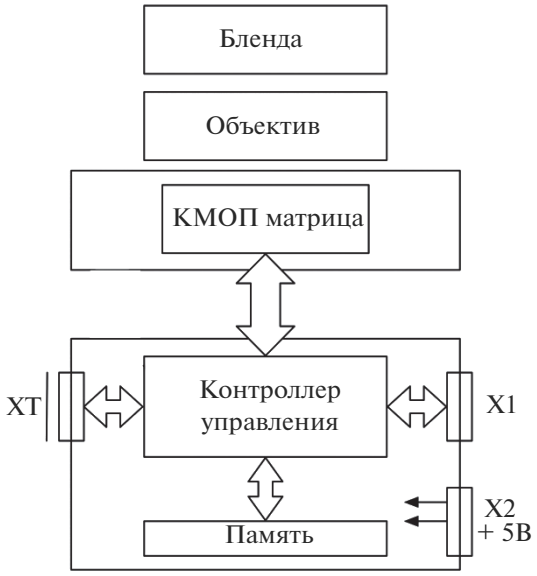


Рис. 8. Функциональная схема камеры из состава СТС-Л.

рабочей зоны манипулятора. Две посадочные камеры – на силовой раме КА, сориентированные вниз по вертикальной оси аппарата для съемки поверхности в ходе снижения КА. Блок БСД установлен на ТСП рядом с другими приборами комплекса научной аппаратуры.

В таблице сведены основные технические и эксплуатационные характеристики СТС-Л, подтвержденные в ходе наземной отработки приборов.

РАБОТА СТС-Л НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ МИССИИ ЛУНА-25

Телевизионная система СТС-Л работает на трех этапах миссии Луна-25, начиная с этапа орбитального движения вокруг Луны и заканчивая этапом работы на поверхности. Первый этап (см. рис. 11) – основное торможение (ОТ), когда КА, находясь в перигее эллиптической окололунной орбиты, снижает скорость с орбитальной 1.7 км/с до полной остановки и вертикализации на высоте около 1300 м над поверхностью. Аппарат при этом сориентирован горизонтально, так, что на поверхность направлена одна из обзорных камер, которая производит съемку подстилающей поверхности с частотой 0.6 кадр/с. Эти изображения впоследствии будет использованы для отработки алгоритмов оптической навигации по естественным ориентирам. Длительность этого этапа составляет порядка пяти мин.

На втором этапе, после основного торможения и вертикализации, аппарат постепенно снижается и садится на поверхность. Высота, скорость снижения и ориентация КА контролируется по данным гироскопов, радиодальномера и допплеровского датчика скорости и угла сноса. Во время этого этапа планируется работа четырех обзорных камер и двух посадочных камер. При помощи обзорных камер будет получен ряд панорамных изображений с частотой порядка 1.4 кадр/с, который после передачи на Землю будет преобразован в видеоряд. Изображения с посадочных камер будут использоваться для построения карты неоднородностей лунной поверхности, которая станет основой для отработки алгоритмов выбора безопасного места посадки в следующих проектах исследования Луны автоматическими станциями.

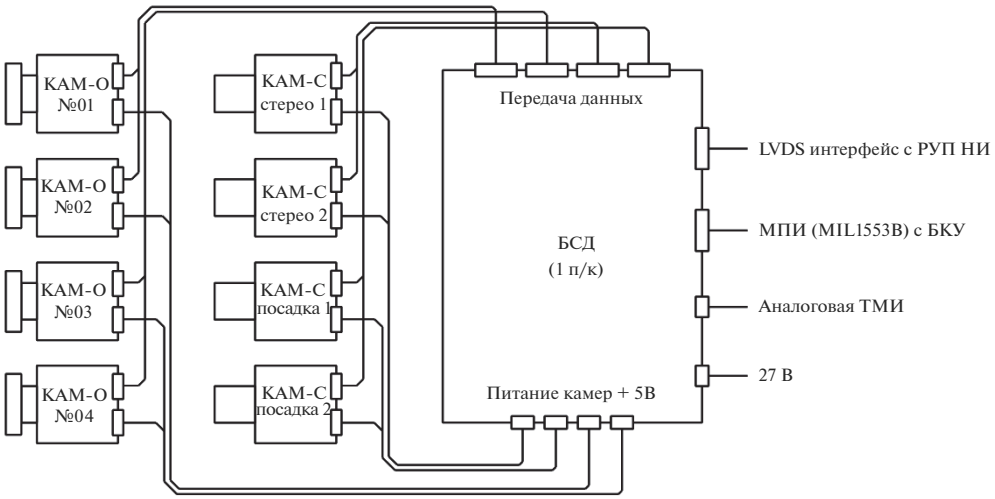


Рис. 9. Блок-схема системы СТС-Л.

Сводка основных технических и эксплуатационных характеристик СТС-Л для КА Луна-25

Параметр	Значение	
Камера	КАМ-О	КАМ-С
Количество камер, шт.	4	4
Угловое поле зрения, °	115 × 115	55 × 55
Размер матрицы, мм	11.264 × 11.264	
Число рабочих пикселей	2048 × 2048	
Расчетное фокусное расстояние объектива, мм	4.8	12.3
Относительное отверстие объектива	1 : 8	1 : 8
Цветность, спектральные каналы, мкм	RGB 0.47, 0.54, 0.62	
Угловой размер пикселя, угл. мин	3.5	1.5
Линейный размер проекции пикселя на поверхность в центре поля зрения на расстоянии установки 2.5 м, мм	2.9	1.14
Глубина резко изображаемого пространства, м	$0.5 - \infty$	$0.5 - 5$
Максимальный темп съемки одной камерой, к/с при размере кадра		
512 × 512 пикселей	10	
1024 × 1024 пикселей	2.5	
2048 × 2048 пикселей	0.5	
Разрядность кодирования яркостей, бит	12	
Динамический диапазон одиночного кадра, дБ	60	
Габариты, мм	76.5 × 109 × 107	105.5 × 109 × 107
Масса, г	350	380
Энергопотребление, Вт	1.8	1.8
Блок сбора и обработки данных (БСД)		
Информационный интерфейс связи с БКУ	МПИ по ГОСТ Р 52070-2003	
Интерфейс связи с РУПНИ	LVDS	
Число высокоскоростных интерфейсов (каналов)	8	
Скорость приема данных на канал, Мбит/с	54	
Объем внутренней энергонезависимой памяти, Гбит	24	
Габариты, мм	227 × 154 × 81	
Масса, г	1800	
Собственное энергопотребление, Вт	10	
Эксплуатационные характеристики СТС-Л		
Номинальное напряжение питания, В	27	
Температура посадочных мест приборов, °С	минус 20... плюс 50	
Направление перегрузок	Любое	
Диапазон рабочих давлений окружающей среды, мм рт. ст.	от 800 до 10^{-10}	
Ресурс работы, ч	1500	
Срок службы, лет	3	

Длительность второго этапа составляет порядка 1 мин.

После касания аппаратом лунной поверхности начинается третий этап съемки, в течение которого используются четыре обзорные камеры и две стереокамеры, установленные на ТСП. С каждой камеры будут поступать цветные изображения в формате 2048 × 2048 пикселов с частотой 0.2 Гц. Съемка ведется до тех пор, пока объем свободной памяти ведущего полукомплекта БСД не составит два Гбит, что соответствует приблизительно 22 панорамам, либо до получения команды “Пре-

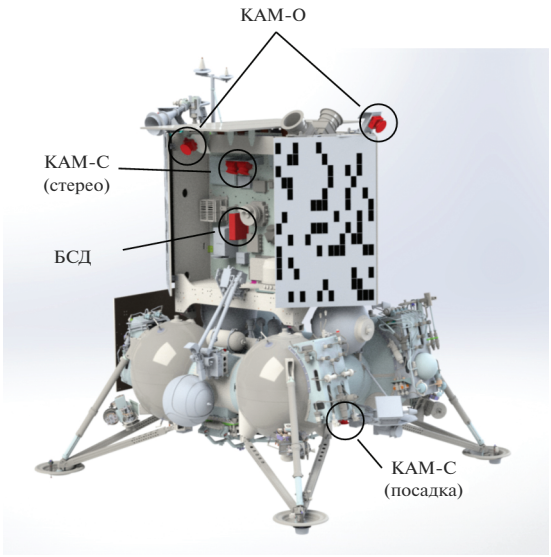


Рис. 10. Внешний вид КА с установленными блоками системы СТС-Л. Еще две камеры КАМ-О, обращенные от наблюдателя на рисунке не видны.

рвать режим", поступающей от бортового комплекса управления. При заполнении памяти ведущий полукомплект БСД автоматически завершает съемку.

Далее, в соответствии с циклограммой работы КНА, в течение первого лунного дня каждые несколько часов будут получаться круговые панорамные изображения поверхности Луны. Во время заката планируется съемка нескольких панорам для фиксации свечения горизонта. Эти данные затем будут использоваться в эксперименте по наблюдению пылевых эффектов над поверхностью Луны.

На этапе работы КА на поверхности с целью обеспечения работы манипуляторного комплекса и приборов ЛАЗМА-ЛР и ЛИС будут включаться две камеры КАМ-С, расположенные на ТСП. По полученным с них изображениям на Земле будет создан трехмерный цветной фотоплан участка поверхности Луны в зоне работы манипулятора и обеспечиваться контроль процесса доставки и выгрузки грунта.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТС-Л И МАНИПУЛЯТОРНОГО КОМПЛЕКСА

В состав научного комплекса КА Луна-25 входит лунный манипуляторный комплекс ЛМК, предназначенный для взятия образцов лунного грунта и доставки его в прибор ЛАЗМА-ЛР для проведения спектрометрических исследований.

Непосредственно перед ЛМК стоят технические задачи точного наведения грунтозаборного устройства на заданный участок, взятие образцов грунта, доставки и выгрузки его в приемное окно прибора ЛАЗМА-ЛР. Выбор участка для забора грунта производится руководством научных экс-

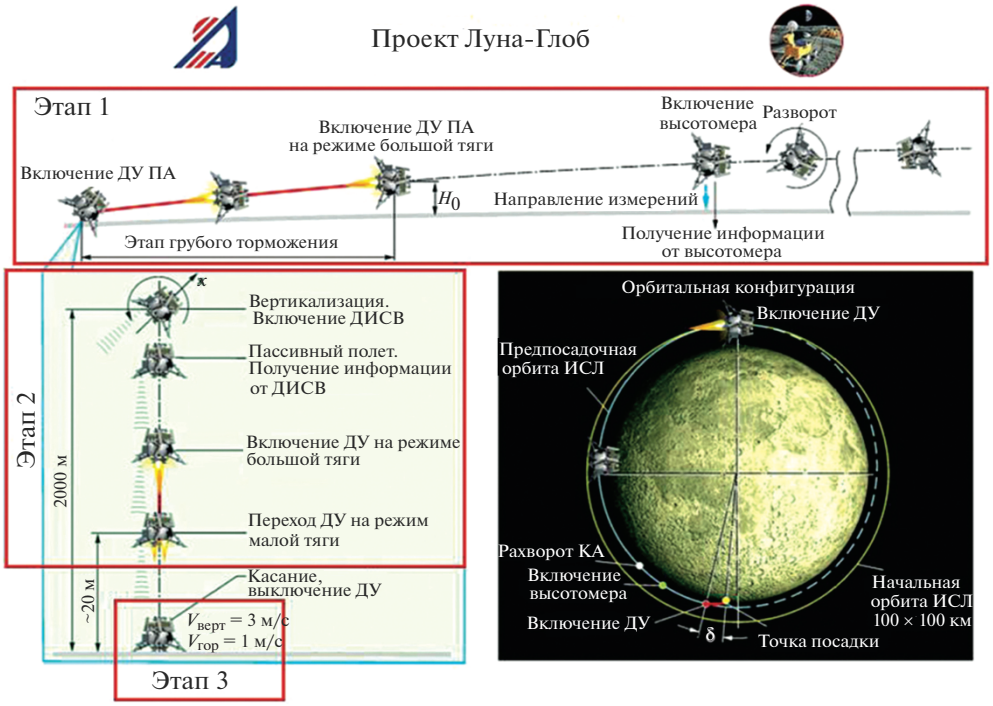


Рис. 11. Этапы миссии Луна-25 (Луна-Глоб). Иллюстрация АО НПО Лавочкина.

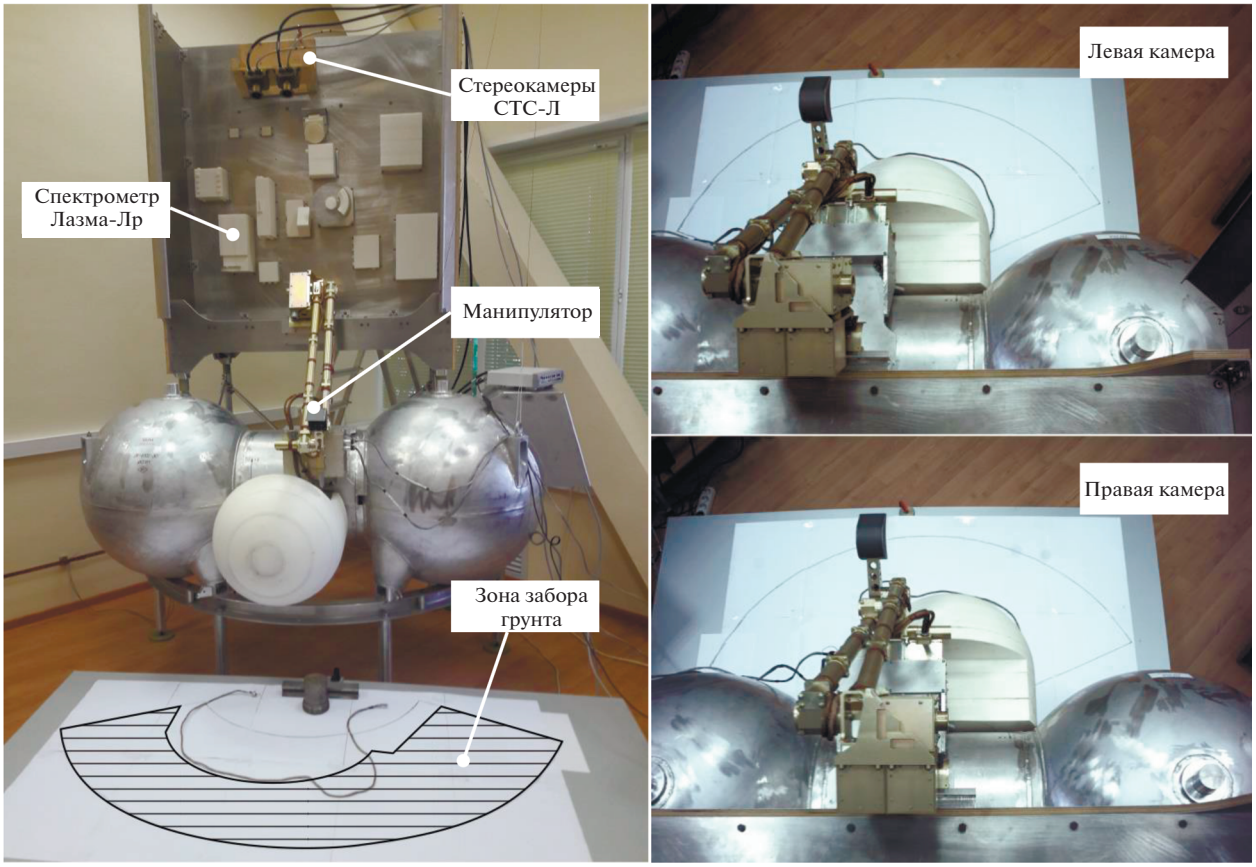


Рис. 12. Стенд для отработки взаимодействия ЛМК и СТС-Л (ИКИ РАН). Слева – общий вид макета, справа – изображения со стереокамер КАМ-С.

периментов в том числе по результатам анализа изображений, полученных со стереокамер СТС-Л.

Для забора пробы грунта манипуляторному комплексу требуется достаточно точное определение местоположения точек “где копать” в системе координат (СК), связанной с конструкцией и законами движения ЛМК. Координаты вычисляются по трехмерной топографической модели участка поверхности, привязанной к приборной СК камер КАМ-С и пересчитываются по измеренным в ходе взаимной калибровки матрицам перехода в СК манипулятора.

На рис. 12 представлены фото технологического стенда, созданного в ИКИ РАН для отработки взаимодействия СТС-Л и ЛМК (Бережков и др., 2018) и определения матриц перехода между их системами координат. На стенде установлены лабораторные образцы приборов в соответствии с компоновочной схемой КА. На левом фото штриховкой показана область, в пределах которой может производиться забор грунта, справа представлена стереопара снимков, полученная камерами КАМ-С.

Построение трехмерной модели снимаемой поверхности в системе координат камер осуществляется на Земле путем обработки полученных со стереокамер изображений по методике, изложенной в (Никитин, 2014). Предварительно, в ходе наземной геометрической калибровки камер, для каждого пиксела фоточувствительных матриц определяются направляющие косинусы радиус-векторов, связывающих линейные координаты точки на кадре и соответствующей точки на наблюдаемом объекте. Тогда, зная линейные координаты изображений одного и того же объекта P на матрицах *S1* и *S2* (см. рис. 13) и параметры радиус-векторов r1 и r2 можно рассчитать пространственные координаты объекта в приборной системе координат камер, которая однозначно связана с системой координат ЛМК.

С помощью машинной обработки пространственные координаты рассчитываются для сетки точек, формируя трехмерную поверхность, на которую накладывается реальное фото и синтезируется трехмерный фотоплан местности, по которому и определяются координаты участков для нацеливания манипулятора. Пример трехмерного фотоплана поверхности песочницы, построенного по снимкам камер СТС-Л, полученных в ходе лабораторных тестов, представлен на рис. 14.

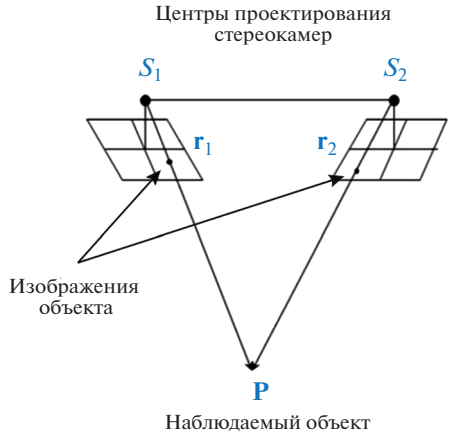


Рис. 13. Схема определения пространственных координат точек, изобразившихся на матрицах двух камер.

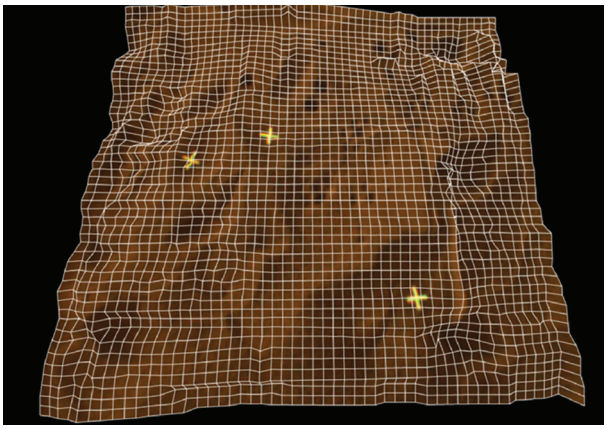


Рис. 14. Пример трехмерного отображения песочницы. Желтые крестики – точки, куда должен навестись манипулятор.

По трехмерным координатам для каждой выбранной цели вычисляются: угол поворота манипулятора, радиальное и вертикальное смещение, которые считаются параметрами движения. После передачи трех параметров движения в систему управления манипулятора осуществляется его перемещение в требуемую область и взятие грунта.

Кроме построения топомодели, по изображениям, полученным от камер КАМ-С, осуществляется контроль положения грунтозаборного устройства (ГЗУ) ЛМК относительно приемного окна прибора ЛАЗМА-ЛР.

Первичное наведение ГЗУ для выгрузки грунта по двум координатам – высоте и широте, осуществляется по рассчитанным целеуказаниям и под контролем телевизионной камеры из состава прибора ЛИС-ТВ-РПМ, установленной на ЛМК. После этого манипулятор останавливается в непосредственной близости от ЛАЗМА-ЛР на расстоянии 5...7 см, чтобы в результате ошибок перемещения не повредить другую аппаратуру КА. Правая камера КАМ-С делает снимок, на котором одновременно отображаются манипулятор, находящийся в промежуточной точке, и приемное окно ЛАЗМА-ЛР (см. рис. 15а). Затем по изображению измеряется фактическое расстояние и вычисляются параметры для точного наведения: азимутальный угол и радиальное смещение, при этом перемещение по высоте не предусматривается. Вычисленные на Земле параметры в виде телекоманд передаются в систему управления манипулятором для завершающего перемещения ГЗУ и выгрузки грунта (см. рис. 15б).

Систематизируя вышеперечисленные процедуры, объем и порядок взаимодействия СТС-Л и ЛМК можно свести к выполнению следующих логических этапов:

– определение параметров взаимного и внешнего ориентирования камер КАМ-С (измеряются до запуска на Земле, уточняются после посадки);

– определение взаимного положения систем координат камер и манипулятора (измеряются до запуска на Земле, уточняются после посадки);

– определение пространственных координат требуемого объекта в рабочей зоне манипулятора с использованием трехмерной модели, построенной по кадрам КАМ-С и расчет управляющих воздействий (производится на Земле);

– определение горизонтальных координат грунтоприемника ЛАЗМА-ЛР и расчет управляющих воздействий для точного наведения ГЗУ (производится на Земле).

ПОЛУЧЕНИЕ КРУГОВОЙ ПАНОРАМЫ

Круговая панорама окружающей обстановки КА Луна-35 формируется из четырех изображений, синхронно получаемых обзорными камерами КАМ-О, установленными на верхнем поясе приборного отсека КА (см. рис. 10). Процесс синтеза панорамы осложняется тем, что все камеры расположены не в единой точке, а разнесены на достаточно большие расстояния как по горизонтали, так и по высоте.

Для формирования круговой панорамы из серии четырех кадров необходимо сначала построить геометрические модели каждой камеры и измерить их взаимное положение друг относительно друга в единой системе координат. Эти процедуры проводятся в ходе наземной отработки с использованием специально созданного стендового оборудования.

Изначально проводится измерение геометрических параметров внутреннего ориентирования всех камер посредством съемки тест-объекта – регулярной опорной сетки из крестов (см. рис. 16). Разработанная методика калибровки камер с малым фокусным расстоянием и с широким полем

(а) (б)



Рис. 15. Подход и выгрузка грунта в макет грунтоприемника прибора ЛАЗМА-ЛР. (а) Изображение с правой КАМ-С – остановка ЛМК в промежуточной точке; (б) процесс выгрузки грунта.

зрения на конечном расстоянии позволяет определить такие геометрические параметры как дисторсия, фокусное расстояние и положение главной точки со среднеквадратической ошибкой 0.5–0.8 пикселя по всему полю кадра.

Измерение параметров взаимного ориентирования камер производится путем фотограмметрической обработки изображений с четырех камер КАМ-О, установленных на стенде, имитирующем взаимное расположения камер на КА (см. рис. 17). Результатом такой калибровки являются согласованные координаты точек фотографирования, ориентация каждой камеры и пространственные координаты связующих точек. Эти параметры служат отправными значениями для дальнейшей отработки методики формирования круговой панорамы.

Процедура объединения четырех кадров в единую панораму состоит из нескольких этапов.

Определяется базовая поверхность, в качестве которой выбирается горизонтальная плоскость до расстояния порядка 25 м (ближний план), расположенная ниже точки центра панорамы на 1.8 м (средняя высота установки камер), в качестве дальнего плана выбирается поверхность бесконечно удаленного цилиндра окружающего всю панораму (см. рис. 18).

Виртуальный центр фотографирования панорамы определяется как как среднее значение пространственного положения центров фотографирования 4-х камер. Каждый луч панорамного снимка пересекается в пространстве с поверхностями ближнего или дальнего плана и определяется массив 3-х мерных точек.

Далее каждая 3-х мерная точка из полученного массива проецируется последовательно на изображения 4-х камер. Для каждой из 4-х камер формируется новое изображение, соответствующее тому, как будто бы съемка велась из виртуального центра панорамы.

При сборке панорамы в области перекрывающихся снимков выбирается тот, у которого расстояние от конкретного пикселя изображения до визирной оси данной камеры меньше. Далее по области перекрытия вычисляются поправочные коэффициенты выравнивания яркости, выполняется сшивка изображений и сохраняется сама панорама.

Проверка методик и программного обеспечения для сшивки панорамы отрабатывались на реальных съемках. Съемки производились как в стационарном положении, так и в движении, имитируя спуск КА на заключительной фазе посадки.

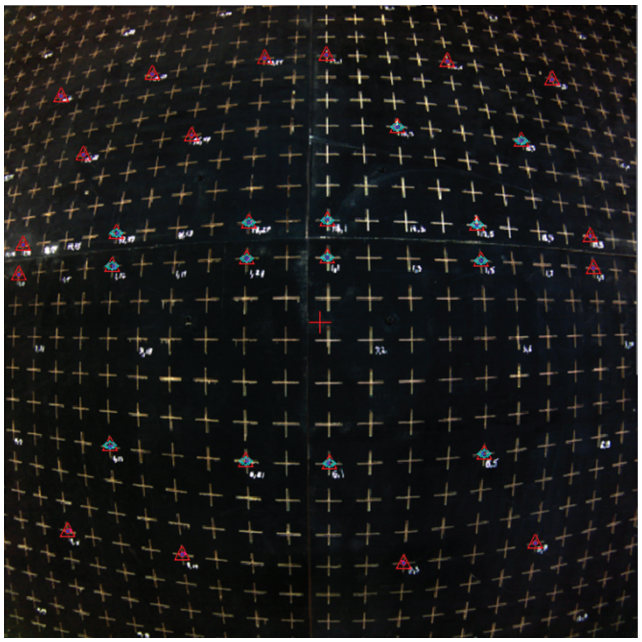


Рис. 16. Изображение опорной сетка калибровки и измерения параметров внутреннего ориентирования камер КАМ-О.

Результатом отработки методики являются собранные в единое изображение бесшовные круговые панорамы. Оно может быть представлено в стереографической или цилиндрической проекциях, широко применяемых при формировании сцен в системах виртуальной реальности. На рис. 19 приведен пример полнокруговой панорамы в цилиндрической проекции, полученной на стенде-макете СТС-Л, установленном во дворе ИКИ РАН.

СЪЕМКА С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Место для посадки КА Луна-Глоб предварительно выбрано в приполярной области Луны, где высота Солнца над горизонтом не будет превышать 20°. Это приведет к присутствию в кадре длинных теней от объектов на поверхности (см. рис. 3), освещенность которых стремиться к нулю. Одновременно, вследствие анизотропности индикатриссы отражательных свойств лунного реголита, в поле кадра будут присутствовать участки поверхности, освещенных Солнцем под малыми фазовыми углами, интегральный коэффициент отражения которых стремится к 1 (см. рис. 20). Кроме того, в пределах кадра будут находится освещенные элементы конструкции космического аппарата, яркость которых значительно превышает яркость окружающего ландшафта.

Собственный динамический диапазон фоточувствительной КМОП матрицы определяется отношением размера зарядовой емкости потенциальной ямы к собственному шуму и, по результатам лабораторных измерений, составляет ~1000 раз или 60 дБ, чего недостаточно для обеспечения яркостного разрешения как в тенях, так и на освещенных участках изображений.

Для расширения динамического диапазона камер, было предложено применение метода, основанного на регистрации нескольких последовательных кадров с различными экспозициями без увеличения объема передаваемых с борта космического аппарата данных. Формирование изображения, содержащего данные о яркостях наблюдаемой сцены с расширенным динамическим диапазоном производится непосредственно на борту посредством разработанного алгоритма (Эльяшев и др., 2014).

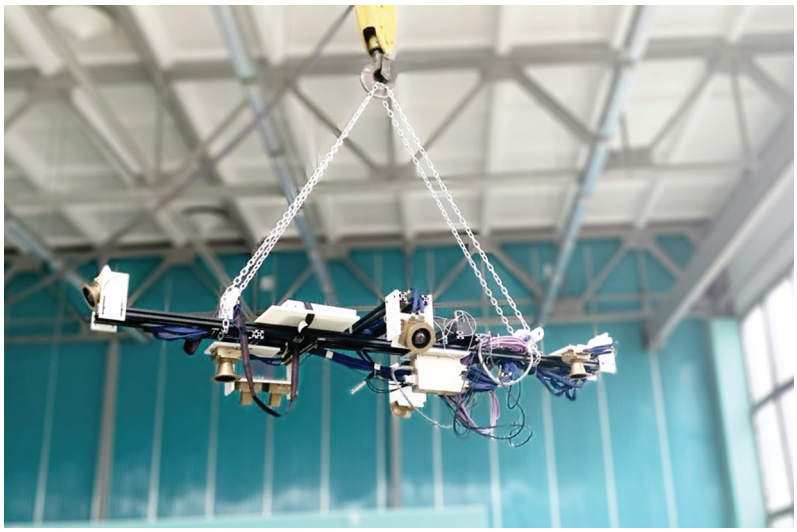


Рис. 17. Автономный стенд-макет СТС-Л на тельфере во время имитации съемок при посадке и на поверхности.

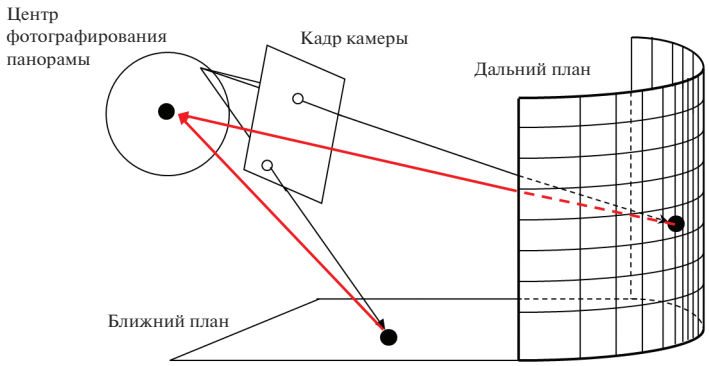


Рис. 18. Построение проективных лучей при формировании панорамы.



Рис. 19. Пример 360° цилиндрической панорамы, полученной камерами СТС-Л.

Алгоритм формирования одного изображения из серии кадров с различными экспозициями состоит в следующем (см. рис. 21):

1. Принимается кадр с минимальной заданной экспозицией, который сохраняется и обозначается как базовый. Одновременно с регистрацией кадра оптического изображения создается “кадр экспозиций” – двумерная матрица такого же размера, в каждую ячейку которого записывается значение экспозиции базового кадра.

2. Затем принимается кадр с экспозицией увеличенной в два раза. Проверяется яркость каждого пикселя: если этот пиксель достаточно яркий, но не пересвеченный (яркость лежит в диапазоне от I_{min} до I_{max}), то соответствующий пиксель базового кадра заменяется на него, а в соответствующий пиксель кадра экспозиций записывается время экспозиции этого пикселя при второй съемке.

3. Далее вновь принимается кадр с удвоенной экспозицией, и операция повторяется. Так происходит несколько раз пока яркость большинства пикселей не окажется выше I_{max}, после чего кадр экспозиций кодируется и записывается в старшие 4 бита итогового кадра изображений, который имеет разрядность 12 бит.

В результате получается один 16-битный кадр, в младших 12 битах которого записана яркость каждого пикселя, а в старших 4 битах закодирова-

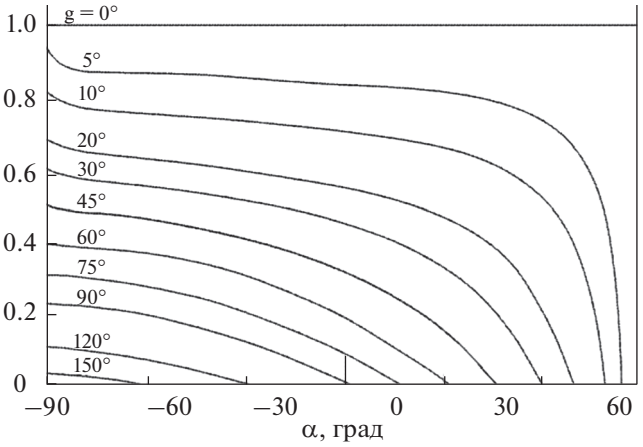


Рис. 20. Распределение коэффициента яркости лунной поверхности как функция фазового угла g и угла α наклона нормали к поверхности по модели Хапке (Hapke, 1993). Распределение дано в плоскости освещения, угол α отсчитывается от направления наблюдения.



Рис. 21. Кадры из серии снимков для получения изображений с большим динамическим диапазоном. Каждая следующая экспозиция больше предыдущей в два раза.

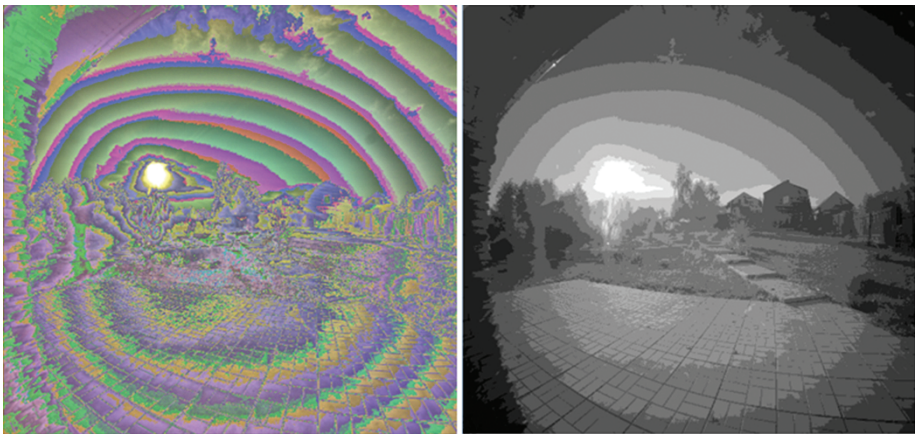


Рис. 22. (а) Кадр изображения, на котором скомбинированы пиксели с нескольких кадров с различными экспозициям; (б) визуальное представление закодированных значений экспозиций.

но время экспонирования, при котором этот пиксель был снят (см. рис. 22). После передачи этого кадра на Землю производится синтезирование изображения с большим динамическим диапазоном путем деления яркости каждого пикселя на его экспозицию, а яркость каждого пиксела записывается числом с плавающей точкой.

В центре обработки данных на Земле производится восстановление (синтез) изображения с большим динамическим диапазоном путем яркостной коррекции каждого пиксела на величину экспозиции и гамма-коррекции итогового изображения, пригодного для отображения на компьютерном мониторе (см. рис. 23).

Многообразие функций и возможных режимов съемки, заложенные в телевизионной аппаратуре СТС-Л, позволят гибко планировать эффективную работу аппаратуры в рамках миссии Луна-25 с учетом как естественных ограничений освещенности места посадки, так и искусственных – лимиты линии передачи данных, тепловой режим КА, увязка с работой бортовой и научной аппаратуры. Предварительная программа-минимум работы аппаратуры в первый лунный день



Рис. 23. Результирующее изображение с расширенным динамическим диапазоном после операции яркостной коррекции.

предусматривает передачу на Землю изображений места посадки, полученных на этапе основного торможения, полной панорамы места посадки, контрольных снимков расчековки манипулятора и стереосъемки рабочей зоны для подготовки работы ЛМК. Полная программа включает передачу видеосъемки процессов торможения, снижения и посадки КА, панорам с расширенным динамическим диапазоном, контрольных съемок забора грунта и его выгрузки и съемок на закате в интересах пылевых экспериментов. Степень выполнения программ и объем передаваемых данных в первую очередь зависит от реально обеспечиваемого времени работы радиопередающего комплекса РУПНИ и качества линии связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л. и др. Задачи, решаемые телевизионной системой навигации и наблюдения в проекте “Фобос-грунт” // Сб. тр. Всеросс. научно-технической конф. “Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов”. Таруса: ИКИ РАН, 2008.

Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л. и др. Телевизионные исследования Фобоса. М.: Наука, 1994. С. 168.

Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Тарнопольский В.И. и др. Телевизионная съемка ядра кометы Галлея. М.: Наука, 1989. С. 295 .

Аванесов Г.А., Степанов Р.М., Любин В.М. Запоминающее устройство на видиконе с регулируемой памятью // Техника кино и телевидения. М.: Госкино, 1969. № 2.

Бережков А.В., Бессонов Р.В., Воронков С.В., Киселев А.Б., Козлова Т.О., Никитин А.В., Полянский И.В., Эльяшев Я.Д. Наземная отработка взаимодействия лунного манипуляторного комплекса и служебной телевизионной системы // Шестая Всеросс. научно-техническая конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Сб. трудов. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 382–392.

Захаров А.В., Дольников Г.Г., Попель С.И., Хандорин С.П., Жуков Б.С., Полянский И.В., Бондаренко А.В. Регистрация пыли в приповерхностной области Луны с помощью бортовых ТВ камер. Предложение по эксперименту на посадочных аппаратах Луна-Глоб и Луна-Ресурс. Методическая записка. М.: ИКИ РАН, 2012.

Маров М.Я., Хантресс У.Т. Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. М.: Физматлит, 2013.

Никитин А.В. Использование Служебной телевизионной системы для контроля и наведения лунного манипуляторного комплекса космического аппарата “Луна-Глоб” // Четвертая Всеросс. научно-техническая конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Сб. трудов. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 206-220.

Эльяшев Я.Д., Бессонов Р.В., Полянский И.В., Прохорова С.А., Жуков Б.С. Алгоритмы работы съемочных камер служебной телевизионной системы космического аппарата “Луна-Глоб” // Четвертая Всеросс. научно-техническая конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Сб. трудов. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 181–205.

Cowell J.E., Robertson S.R., Horányi M., Wang X., Poppe A., Wheeler P. Lunar dust levitation // J. Aerospace Eng. 2009. P. 1–9.

Hapke B. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. New York: Cambridge Univ. Press, 1993.

Lumme K., Bowell E. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies // Astron. J. 1980. V. 86. № 11. P. 1694, 1705.

Maki J.N., Golombek M., Deen R. et al. The Color Cameras on the InSight Lander // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. 105.

Maki J.N., Bell J.F.III, Herkenhoff K.E. et al. Mars Exploration Rover Engineering Cameras // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 24.

Matijevic J.R., Avril L.W., Banes R.S. et al. The Pathfinder Microrover // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 3989–4001.

Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M. A dynamic fountain model for lunar dust // J. Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 59–66.

Tompkins S., Carlé P. Spectral characteristics of lunar impact melts and inferred mineralogy //Meteoritics and Planet. Sci. 2010.

Yingzhuo Jia, Yongliao Zou, Jinsong Ping, Changbin Xue, Jun Yan, Yuanming Ning. The scientific objectives and payloads of Chang’E–4 mission // Planet. and Space Sci. 2018.

Zelenyi L.M., Korablev O.I., Rodionov D.S. et al. Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. P. 509–517.