

УДК 629.787:621.397

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ КА ЭКЗОМАРС-2022

© 2023 г. Н. Ф. Абрамов^a, *, И. В. Полянский^a, С. А. Прохорова^a, Я. Д. Эльяшев^a

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

*e-mail: abramov.n2@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2022 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 03.03.2023 г.

В работе представлены результаты наземной отработки телевизионной системы посадочной платформы (ТСПП-ЭМ) из состава комплекса научной аппаратуры космического аппарата (КА) ЭкзоМарс-2022, в рамках которой были проведены проверки функционирования в разных режимах, выполнены измерения характеристик и калибровки камер. В ходе испытаний в ИКИ РАН был получен фотоматериал с каждой камеры КАМ-О/ЭМ. При этом камеры были установлены на стенде, имитирующем посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в полном масштабе. Кроме этого, были отдельно проведены измерения важнейших характеристик камер: угловое поле зрения по горизонтали и вертикали, дисторсия, фокусное расстояние, разрешающая способность, динамический диапазон, коэффициент виньетирования, абсолютная чувствительность.

Ключевые слова: ТСПП-ЭМ, дистанционные съемки, ЭкзоМарс-2022, Марс, панорамная съемка, видеосъемка, телевизионная система, наземные испытания

DOI: 10.31857/S0320930X23040011, **EDN:** RDSOTP

ВВЕДЕНИЕ

В мире в последние 20 лет наблюдается ошеломительный рост числа программ, посвященных исследованию Марса. В основе этих программ лежат разработка, испытания и последующий запуск к Марсу специального исследовательского оборудования. Среди наиболее известных — посадка марсоходов Mars Exploration Rover (MER), Curiosity, Perseverance и платформы InSight. Очередным важным шагом стала разработка космического аппарата (КА) ЭкзоМарс-2022 (совместный проект ГК Роскосмос и Европейского космического агентства, ESA), состоящего из двух модулей: перелетного и десантного. Десантный модуль содержит марсоход и посадочную платформу (см. рис. 1), оснащенную научными приборами для исследования Марса. Цель миссии — это исследование поверхности и подповерхностного слоя в непосредственной близости к месту посадки, проведение геологических проб с целью обнаружения жизни в прошлом и в настоящем (Vago и др., 2017; Zelenyi и др., 2015).

Экспедиция ЭкзоМарс-2022 состоит из трех основных этапов:

- этап выведения и перелета составного КА;
- этап спуска—посадки десантного модуля на поверхность Марса;
- этап работы на поверхности Марса.

Этап работы на поверхности Марса включает в себя 3 фазы:

- фаза функционирования посадочной платформы на поверхности Марса до съезда марсохода;
- фаза съезда марсохода с посадочной платформы;
- фаза функционирования посадочной платформы на поверхности Марса после съезда марсохода.

В последние годы, с учетом увеличения числа и объема научных задач, особо актуальным стало создание нового поколения телевизионных систем для дистанционных фото- и видеосъемки небесных тел. Это потребовало от разработчиков использования принципиально других конструкторских решений и создания новых алгоритмов функционирования приборов. Решение задачи получения визуальных изображений является практически обязательным для любой космической миссии, связанной с дистанционными контактами исследованиями поверхностей планет и других небесных тел с помощью автоматических посадочных станций, что не стало исключением и для КА ЭкзоМарс-2022 благодаря установке телевизионной системы ТСПП-ЭМ на посадочную платформу (Абрамов и др., 2018).

Оптико-физические характеристики телевизионных систем в значительной степени опреде-

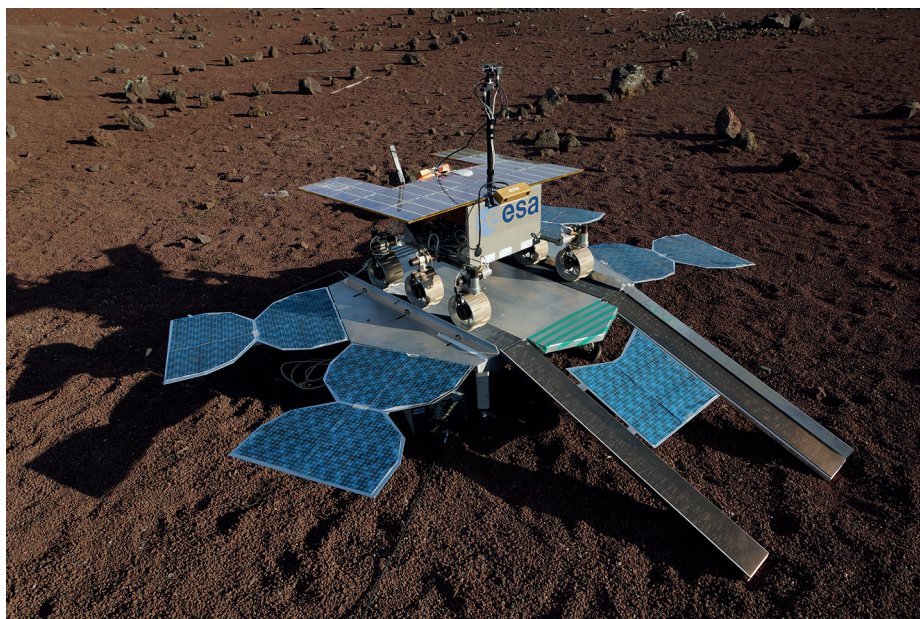


Рис. 1. Посадочная платформа КА ЭкзоМарс-2022 (с раскрытыми солнечными панелями и трапом для марсохода), на которую устанавливается ТСПП-ЭМ. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/11/Egress_test_rover_in_CNES_Mars_Yard

ляют качество целевой информации — фото- и видеоматериалов. Поэтому большое внимание было уделено калибровке и исследованию опτικο-физических характеристик ТСПП-ЭМ в рамках наземной отработки.

НАЗНАЧЕНИЕ И ЗАДАЧИ ТСПП-ЭМ

Телевизионная система ТСПП-ЭМ предназначена для установки на посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 и эксплуатации в составе комплекса научной аппаратуры во время посадки и на поверхности планеты Марс с целью решения задач научного и прикладного характера путем регистрации фото- и видеоинформации. ТСПП-ЭМ представляет собой комплекс из четырех опτικο-электронных камер (КАМ-О/ЭМ) и вычислительного устройства БСД/ЭМ, предназначенного для формирования цифровых изображений окружающей обстановки и объектов, находящихся в пределах поля зрения камер, с сохранением полученной информации для последующей передачи по радиоканалу на наземные пункты приема данных или ретрансляторы.

В ходе работы ТСПП-ЭМ во время посадки на Марс и на его поверхности предусмотрено выполнение следующих основных научных задач:

- регистрация цветных статичных изображений поверхности и атмосферы Марса (во время и после посадки КА ЭкзоМарс-2022) в видимой области оптического диапазона электромагнитных волн;

- проведение цветной видеосъемки приповерхностных и атмосферных процессов, в том числе исследование пылевой экзосферы Марса;

- измерение спектральных яркостей (цветности) окружающих объектов на трех длинах волн: 0.45, 0.55 и 0.65 мкм;

- формирование круговой панорамы поверхности Марса вокруг места посадки КА ЭкзоМарс-2022 и построение видеоряда панорам;

- исследование окружающей обстановки на поверхности Марса в диапазоне горизонтальных углов до 360°;

- анализ отражательных/цветовых характеристик участка посадки КА ЭкзоМарс-2022;

- геоморфологический анализ участка посадки КА ЭкзоМарс-2022;

- поддержка других научных экспериментов путем регистрации изображений или видеопоследовательностей.

В ТСПП-ЭМ реализован ряд новых решений, в том числе в части алгоритмического обеспечения, которые позволят получить важную информацию по основным направлениям исследований. В отличие от предыдущих миссий, в которых построение панорамы осуществлялось путем последовательной съемки отдельных секторов одной камерой, установленной на поворотной платформе, а спектральная информация получалась последовательной сменой светофильтров, в данном эксперименте предусматривается одновременное получение панорамы в цвете четырьмя стационарными камерами, обеспечивающими

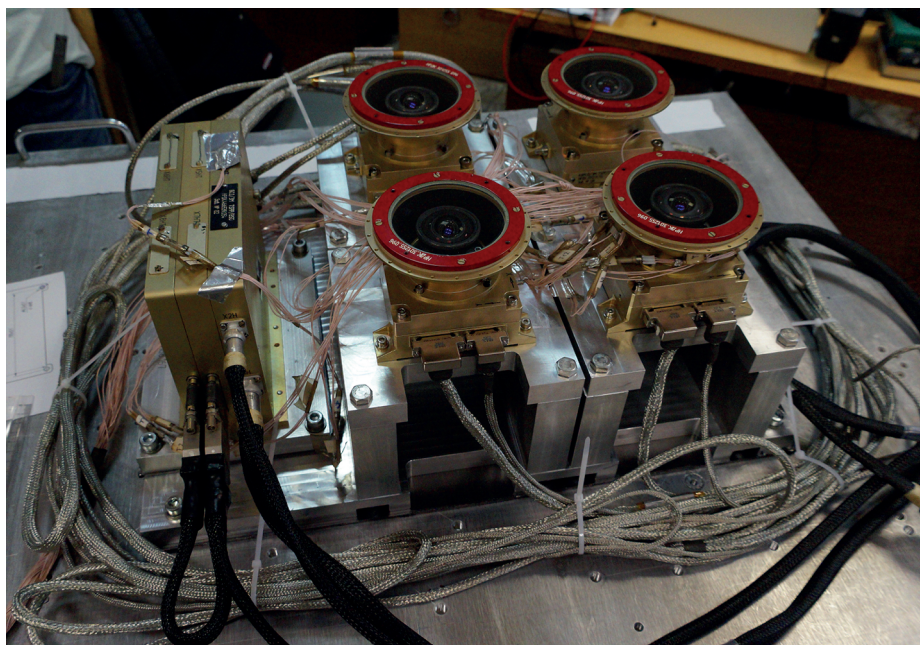


Рис. 2. Блок сбора данных БСД/ЭМ (слева), четыре камеры КАМ-О/ЭМ (справа) и межблочные кабели, входящие в состав ТСПП-ЭМ, на испытаниях в ИКИ РАН.

полный круговой обзор. Это позволит на значительно лучшем качественном уровне исследовать динамические атмосферные процессы, в частности, процессы переноса пыли и пылевые бури.

Эксперимент запланирован в той части Марса (долина Оксия), где до сих пор не проводились исследования с посадочных модулей и роверов (Mandon и др., 2021). В сочетании с высоким качеством фото- и видеосъемок можно с уверенностью сказать, что телевизионный эксперимент может дать новые данные о структуре и составе поверхности, свойствах почвы, атмосферных характеристиках в районе посадки и, в сочетании с данными других экспериментов, — новую информацию по фундаментальным проблемам исследования Марса, в частности, его геологии, истории, климата и др.

Высокое пространственное разрешение камер ТСПП-ЭМ открывает возможность получения резких изображений мелких элементов, таких, как камни, песок, позволит обнаружить изменения рельефа, пылевое покрытие и другие особенности породы и почвы, важные для установления происхождения поверхностных элементов. Таким образом, ТСПП-ЭМ может определить как локальные особенности рельефа, так и общую картину местности.

КОНСТРУКЦИЯ ТСПП-ЭМ

ТСПП-ЭМ, установленная на испытательной оснастке, представлена на рис. 2.

БСД/ЭМ представляет собой резервированную вычислительно-управляющую машину с набором информационных интерфейсов и энерго-независимой памятью для хранения данных, реализованную в виде моноблока. К основным функциям устройства относятся коммутация питания и управление работой четырех камер на различных этапах работы КА ЭкзоМарс-2022, прием, сжатие и передача данных для трансляции на Землю, а также расширенные пользовательские функции обработки изображений и управления файловой системой накопителя данных.

БСД/ЭМ отличается большим объемом энергонезависимой памяти, что позволяет сохранять в нем необходимые массивы фото- и видеоданных до передачи в блок БИП КА ЭкзоМарс-2022.

Камеры КАМ-О/ЭМ предназначены для установки на внешних незатененных участках корпуса КА ЭкзоМарс-2022 с целью получения обзорных изображений окружающей обстановки в пределах поля зрения с целью формирования круговой замкнутой панорамы в режиме фото- и видеосъемки. Полученные камерами изображения в виде цифрового потока передаются в БСД/ЭМ. Основные технические характеристики КАМ-О/ЭМ приведены в табл. 1.

В КАМ-О/ЭМ используется малоформатный широкоугольный объектив, специально разработанный для ТСПП-ЭМ с фокусным расстоянием $f = 4.8$ мм, угловым полем зрения $115^\circ \times 115^\circ$ и относительным отверстием $D : f = 1 : 8$.

Таблица 1. Основные характеристики КАМ-О/ЭМ

Характеристика	Значение
Угловое поле зрения, угл. град	115 × 115
Число рабочих пикселей	2048 × 2048
Относительное отверстие объектива	1 : 8
Выходная разрядность квантования, бит, не менее	8
Цветность	RGB
Максимальный темп съемки, не менее	1 кадр/с
Динамический диапазон одиночного кадра, дБ	60
ГРИП (глубина резко изображаемого пространства) при диаметре кружка нерезкости, равном 1.6 диагонали пикселя датчика изображения, м, не менее	от 1.0 до ∞
Разрешающая способность, не хуже	65 (пар линий)/мм

Таблица 2. Форматы изображений, получаемых при работе с камерами

Ширина × высота, пиксель	Бинирование	Разрядность, бит	Цветность	Объем в памяти, Мбит
2048 × 512	Нет	12	RGB	16
1024 × 1024	2 × 2	14	Монохром	16
1024 × 1024	2 × 2	14	RGB	16
2048 × 2048	Нет	12	RGB	64

Фотоматрица является высоко интегрированным микроэлектронным прибором, предназначенным для регистрации оптического изображения и передачи его в виде цифровых видеоданных на внешние устройства. По разработанной в ИКИ РАН методике каждая фотоматрица проходит процедуру настройки перед установкой в прибор.

По сравнению с камерами, использованными в других миссиях, КАМ-О/ЭМ имеет матрицу большего разрешения, а также большое поле зрения, что позволит получить изображения значительно лучшего качества.

Для повышения частоты съемки при посадке в камерах реализовано бинирование кадра, при котором размер изображения уменьшается в 4 раза. Форматы изображений, получаемые с камер ТСПП-ЭМ, приведены в табл. 2.

Из конструктивных особенностей также важно отметить, что в азимутальной плоскости оптические оси всех четырех камер (КАМ-О/ЭМ) разнесены на 90°, что позволяет обеспечить полный обзор линии горизонта за счет перекрывающихся полей зрения камер (рис. 3). Камеры размещены на краях посадочной платформы в непосредственной близости от внешнего контура на специальных кронштейнах (рис. 4).

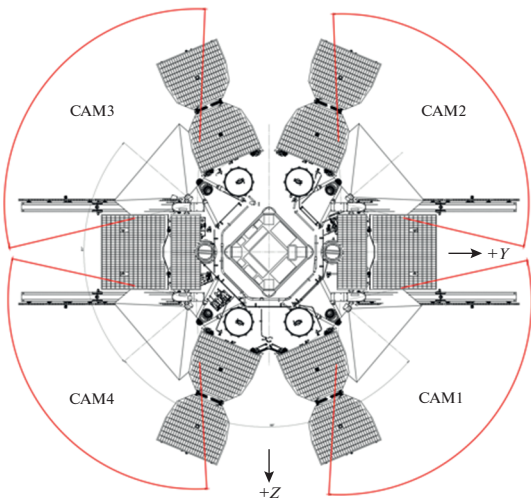


Рис. 3. Горизонтальные поля зрения камер ТСПП-ЭМ, установленных на посадочной платформе КА ЭкзоМарс-2022.

НАЗЕМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТСПП-ЭМ

Для подтверждения работоспособности ТСПП-ЭМ в ИКИ РАН была проведена серия испытаний, как отдельных камер, так и всей системы в целом. Описанные в настоящей статье испытания были направлены на подтверждение геометрических и радиометрических характеристик камер, так как именно эти характеристики определяют качество изображений, передаваемых ТСПП-ЭМ (Эльяшев и др., 2015).

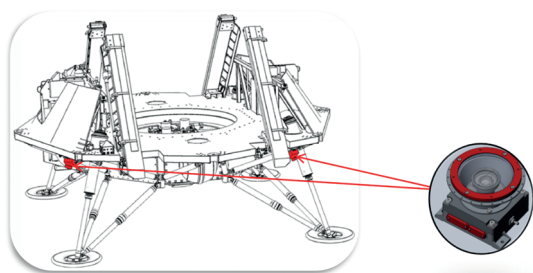


Рис. 4. Расположение камер КАМ-О/ЭМ прибора ТСПП-ЭМ на посадочной платформе КА ЭкзоМарс-2022 и увеличенный вид одной из них (две камеры выделены красным и отмечены стрелками; остальные две камеры симметрично расположены на противоположной стороне и не показаны).

В ходе испытаний были проверены следующие характеристики камер:

- поле зрения;
- разрешающая способность;
- глубина резко изображаемого пространства (ГРИП);
- коэффициент неравномерности чувствительности камер по полю зрения;
- абсолютная чувствительность камер;
- динамический диапазон камер;
- дисторсия камер.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАМ-О/ЭМ

Проверка поля зрения проводилась при помощи поворотного стола. Напротив камеры устанавливалась мишень, имеющая четко выраженную отметку в центре (рис. 5). Поворотный стол вращался так, чтобы отметка попадала на край кадра (рис. 6). Разница в показаниях угла поворота стола и есть угловое поле зрения объектива. Для всех камер КАМ-О/ЭМ поле зрения по горизонтали и вертикали составило 112°.

Для определения разрешающей способности камер использовалась та же мишень Siemens Star. Она представляет собой 60 или 120 радиальных черных штрихов на белом фоне. При съемке такой мишени, на определенном расстоянии от центра черные полосы начинают сливаться вместе и уже нельзя различить визуально две отдельные полосы (рис. 7). Измерив толщину штрихов на этом расстоянии, можно вычислить разрешающую способность в парах линий/пиксель, а разделив эту величину на размер пикселя перейти к общепринятым парам линий/мм. Предельная разрешающая способность этой матрицы составляет около 90 пар линий/мм. Однако, так как матрица цветная и на ее пиксели нанесены цвет-

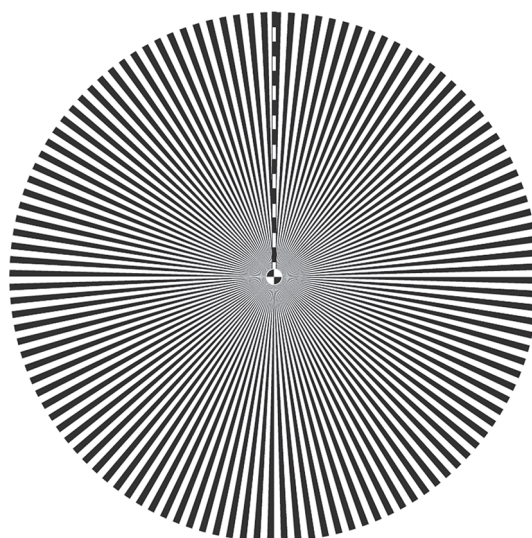


Рис. 5. Мишень Siemens Star, использовавшаяся для определения разрешающей способности камер в пределах поля зрения.

ные светофильтры (байеровский фильтр, рис. 8), то предельная разрешающая способность уменьшается примерно в $\sqrt{2}$ раз, т.е. до 65 пар линий/мм.

Разрешающая способность по мишени Siemens Star определяется следующим образом:

- измеряется радиус области в пикселях, где штрихи неразличимы;
- ширина штрихов на указанном расстоянии вычисляется согласно формуле:

$$S = 2\pi r / N, \quad (1)$$

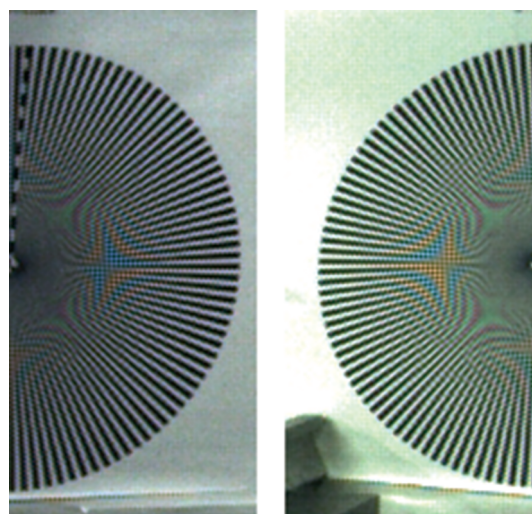


Рис. 6. Фрагменты кадров при крайних положениях мишени.

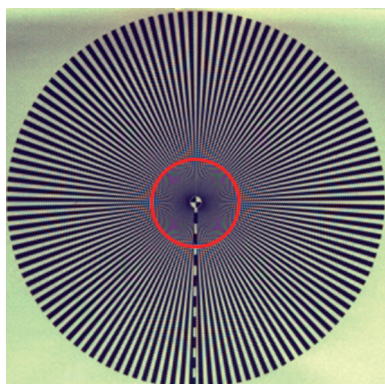


Рис. 7. Изображение мишени Siemens Star на расстоянии 1 м. Красным кругом показана область, где штрихи неразличимы.

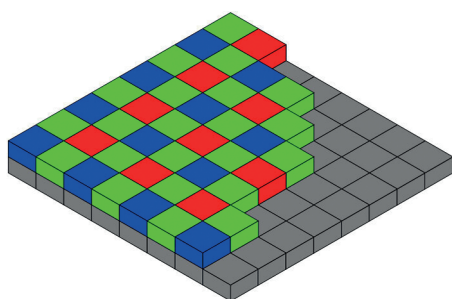


Рис. 8. Фильтр Байера на матрице камер.



Рис. 9. Изображение границы, по которой проводилось измерение разрешающей способности по удаленному объекту.

где r — измеренный радиус; N — число штрихов в мишени;

• разрешающая способность вычисляется согласно формуле:

$$R = 1/(Sp), \quad (2)$$

где p — размер пикселя и дается в парах линий/мм.

Измерения при помощи мишени Siemens Star показали, что разрешающая способность камер находится на уровне 70 пар линий/мм.

Также была измерена разрешающая способность по резкой границе удаленного объекта путем измерения функции размытия границы (Edge Spread Function), по которой можно вычислить функцию передачи модуляции (MTF). Для проверки была выбрана контрастная граница удаленного здания. Измерения показали те же результаты, что и измерения по мишени. В качестве удаленного объекта была выбрана резкая граница дома, находящегося на расстоянии более 400 м (рис. 9).

Глубина резко изображаемого пространства (ГРИП) определяется как диапазон расстояний, при которых кружок рассеяния не превышает 1.6 диагонали пикселя. Формула для вычисления ближней и дальней границ ГРИП:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{Rf^2}{f^2 - Kfz + KRz}, \\ R_2 = \frac{Rf^2}{f^2 + Kfz - KRz} \end{cases}, \quad (3)$$

где R_1 — дистанция до передней границы резко изображаемого пространства; R — дистанция фокусировки; R_2 — дистанция до задней границы резко изображаемого пространства; f — фокусное расстояние объектива в метрах; K — знаменатель геометрического относительного отверстия объектива или диафрагменное число; z — диаметр кружка нерезкости или допустимый кружок рассеяния.

По формуле вычисления ближней и дальней границ ГРИП (3) с учетом того, что на расстоянии 2.5 м и на удаленных объектах кружок рассеяния значительно меньше 1.6 диагонали пикселя, получается, что ближняя граница ГРИП лежит не дальше 0.5 м, а дальняя граница находится в бесконечности. Это значит, что при поле зрения 112° градусов и формате матрицы 2048×2048 пикселей, камеры имеют угловое разрешение во всем наблюдаемом пространстве около $4'$, или 3.5 мм на расстоянии 3 м.

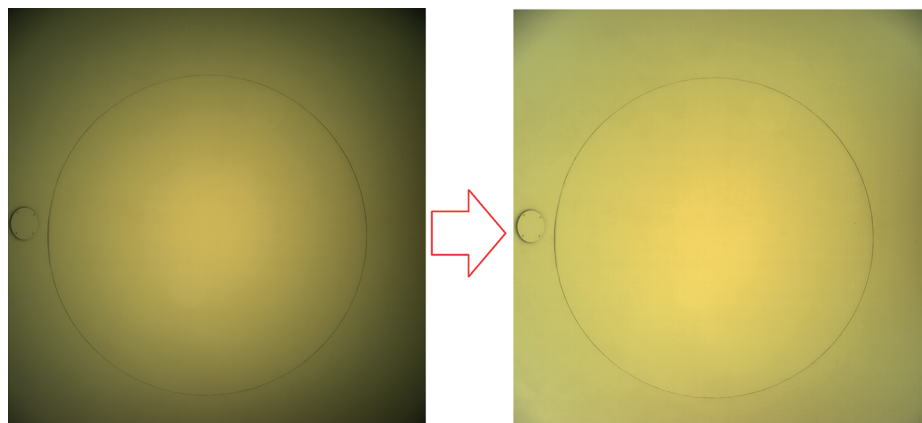


Рис. 10. Результат коррекции неравномерности освещенности по полю зрения.

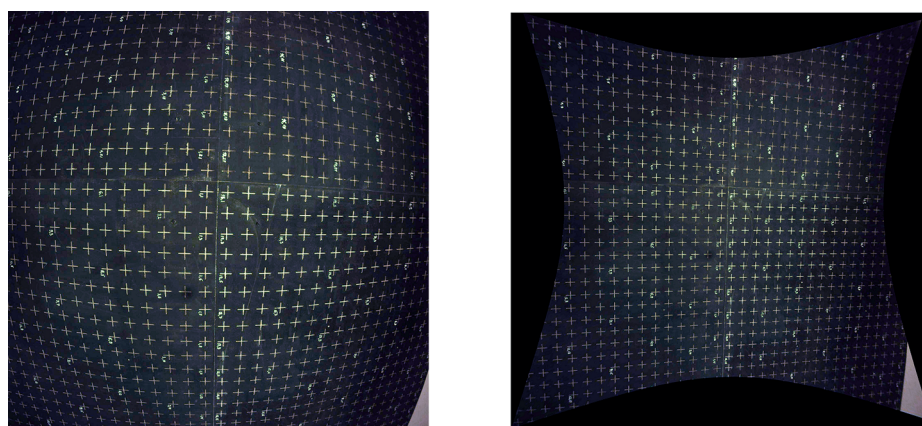


Рис. 11. Исходное изображение стенда и геометрически скорректированное изображение.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ, АБСОЛЮТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА КАМ-О/ЭМ

Немаловажным параметром камер является неравномерность чувствительности по полю зрения. Широкопольные объективы имеют сильное падение освещенности на краях и для получения равномерных по всему полю зрения кадров необходимо знать степень этого падения освещенности. Для измерения этой неравномерности использовалась калиброванная интегрирующая сфера. Такая сфера дает равномерную освещенность по всему полю зрения, соответственно падение яркости на полученном кадре и будет исходной неравномерностью освещенности. Измерения показали, что яркость в углу кадра составляет около 15% от яркости в центре кадра, что соответствует расчетам. По полученным кадрам были составлены полиномы коррекции, которые будут применяться при обработке полученных

изображений для компенсации этой неравномерности (рис. 10).

Использовавшаяся интегрирующая сфера была откалибрована, т.е. была известна ее спектральная яркость в абсолютных величинах. Также были известны спектральная чувствительность матрицы в каждом из каналов и спектральное пропускание объективов. Путем некоторых математических операций, зная эти параметры и измерив яркость реального изображения сферы на камере, мы получили коэффициенты абсолютной чувствительности камер, которые затем использовались для расчета требуемых времен экспонирования. Так же эти камеры теперь могут быть использованы для фотометрии снимаемой сцены.

Еще одним параметром, определяющим качество получаемых изображений, является динамический диапазон камер. Упрощенно, динамический диапазон определяется как отношение яркости самого светлого объекта, различимого камерой, к яркости самого темного объекта, все еще различимого на фоне шумов. Для КАМ-О/ЭМ самым яр-



Рис. 12. Камеры КАМ-О/ЭМ (4 шт.) прибора ТСПП-ЭМ на стенде, имитирующем посадочную платформу КА Экзо-Марс-2022 в ходе испытаний в ИКИ РАН.

ким объектом является уровень около 4095 градаций АЦП (фотоматрицы оснащены 12-битным АЦП), а темновой шум у них находится на уровне 5.5 градаций АЦП. Таким образом, принимая, что объект становится различимым, когда его яркость равна величине шума, мы находим, что динамический диапазон камер составляет около 750 (или 57.5 дБ).

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСТОРСИИ КАМЕР КАМ-О/ЭМ

В задачи ТСПП-ЭМ входит составление круговой панорамы вокруг аппарата. Для этой задачи необходимо провести геометрическую калибровку камер, которая связывает реальные углы с координатами на матрице. Из-за большого поля зрения камер изображения имеют сильные искажения на краях, не позволяющие без дополнительных калибровок вычислить направление на объект на изображении. Калибровка проводилась в фотограмметрическом программном обеспечении PhotoMod. Для калибровки использовался стенд с равномерными метками (рис. 11). Видно, что изображение имеет форму “подушки” и требует серьезных корректировок. В качестве модели дисторсии была принята формула физической дисторсии (4).

$$\begin{aligned} x_{corr} &= x - k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - \\ &\quad - P_1(2x^2 + r^2) - 2P_2 xy - b_1 x - b_2 y, \\ y_{corr} &= y - k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - \\ &\quad - P_2(2y^2 + r^2) - 2P_1 xy - a_1 x - a_2 y, \\ r^2 &= x^2 + y^2. \end{aligned} \quad (4)$$

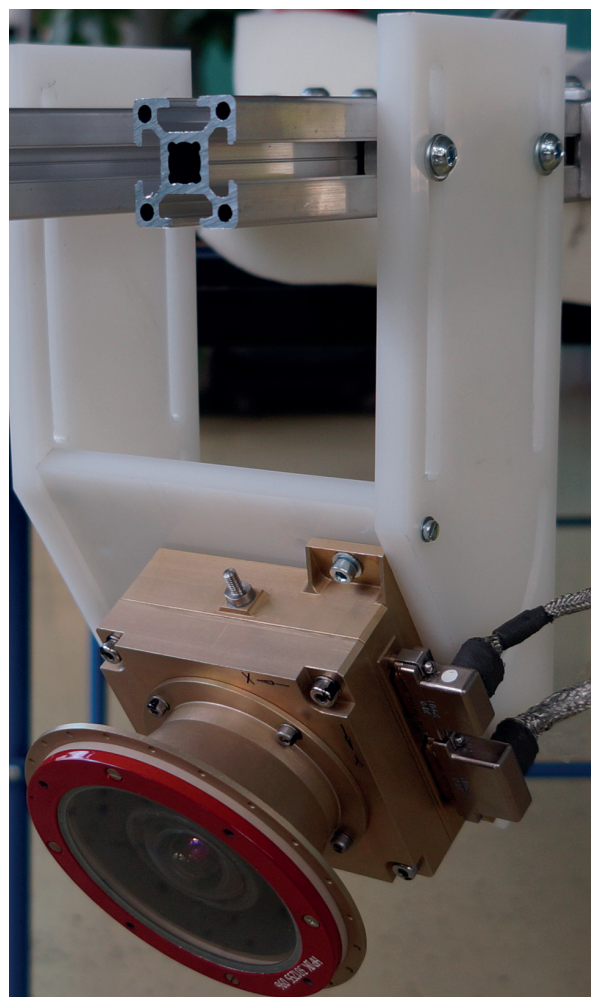


Рис. 13. Одна из камер КАМ-О/ЭМ прибора ТСПП-ЭМ на стенде, имитирующем посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в ходе испытаний в ИКИ РАН.

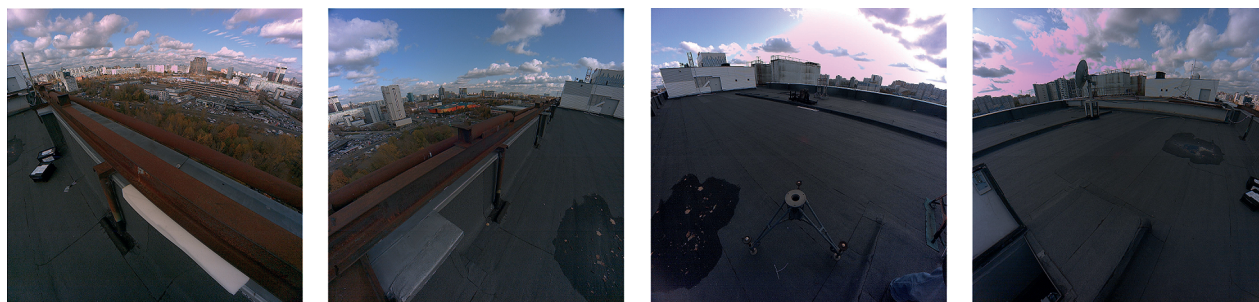


Рис. 14. Кадры, полученные ТСПП-ЭМ во время функциональных испытаний.



Рис. 15. Итоговая панорама, полученная в результате соединения четырех кадров ТСПП-ЭМ.

После коррекции изображение становится “плоским” и координаты на нем напрямую связаны с угловым направлением на объекты (рис. 11). Такие изображения уже можно использовать для решения фотограмметрических задач, например, для построения круговой панорамы и построения трехмерной модели рельефа вокруг аппарата.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТСПП

После проверки всех характеристик камер были проведены комплексные функциональные испытания. В этой статье приводятся результаты сборки панорамного изображения, однако полные функциональные испытания включали в себя множество других проверок. В них входили проверки работоспособности во всех режимах, начиная с предполетной проверки, заканчивая посадкой на Марс и работой на его поверхности, различные испытания надежности, температурные и вакуумные испытания и многое другое.

Для получения изображений был разработан и изготовлен стенд, имитирующий посадочную платформу КА ЭкзоМарс-2022 в части расположения мест камер (рис. 12).

Стенд соответствовал как линейным, так и угловым размерам посадочных мест КА ЭкзоМарс-2022. На рис. 13 показана одна из камер, размещенных под углами в 32.5° .

Стенд был установлен на крыше ИКИ РАН и была произведена одновременная съемка окружающего пространства всеми четырьмя камерами КАМ-О/ЭМ. В ходе обработки кадров была устранена неравномерность чувствительности каждой камеры. Также были проведены цвето-коррекция, гамма-коррекция яркости и другие стандартные операции. Полученные изображения (рис. 14) были геометрически скорректированы и при помощи специализированного ПО склеены в панораму (рис. 15). Небольшие перепады яркости между кадрами обуславливаются тем, что при обработке не была учтена абсолютная чувствительность камер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе наземных испытаний было подтверждено, что оптико-физические характеристики ТСПП-ЭМ позволят успешно выполнить задачи научной миссии.

Использованные при разработке конструкторские, технологические и программные решения обеспечивают для ТСПП-ЭМ:

- полный круговой обзор камерами;
- получение резких изображений во всем интервале расстояний;
- получение цветовой информации;

- широкий динамический диапазон для съемки как освещенных, так и затененных участков поверхности;

- достижения компромисса между размером изображения (с учетом узкой ширины полосы пропускания радиоканала) и его качеством за счет использования оптимального алгоритма сжатия изображения.

С учетом чрезвычайной востребованности качественной фото- и видеоинформации открываются перспективы использования ТСПП-ЭМ для исследования также и других небесных тел в составе будущих космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов Н.Ф., Воронков С.В., Никитин А.В., Полянский И.В., Фори А.А. Обеспечение дистанционных телевизионных съемок на посадочной платформе космического аппарата “ЭкзоМарс-2020” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 188–200.
- Эляшев 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” // Сб. тр. конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Москва. 2015. С. 181–206.
- Mandon L., Bowen A.P., Quantin-Nataf C., Bridges J.C., Carter J., Pan L., Beck P., Dehouck E., Volat M., Thomas N., Cremonese G., Tornabene L.L., Thollot P. Morphological and spectral diversity of the clay-bearing unit at the ExoMars landing site Oxia Planum // Astrobiology. 2021. V. 21. № 4. P. 464–480.
- Vago J.L., Westall F., Pasteur Instrument Teams, et al. Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars Rover // Astrobiology. 2017. V. 17. № 6. P. 471–510.
- Zelenyi L.M., Korablev O.I., Rodionov D.S., Novikov B.S., Marchenkov K.I., Andreev O.N., Larionov E.V. Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. P. 509–517.
- Абрамов Н.Ф., Воронков С.В., Никитин А.В., Полянский И.В., Фори А.А. Обеспечение дистанционных телевизионных съемок на посадочной платформе космического аппарата “ЭкзоМарс-2020” // Современные