

4. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во „Лань“, 2010. 304 с.
5. Максудов Д. Д. Изготовление и использование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.

Сведения об авторах**Марина Евгеньевна Зацепина**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: marichka_za@list.ru

Владимир Константинович Кирилловский

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
30.12.13 г.

УДК 681.078

А. Н. ЛИПАТОВ, А. П. ЭКОНОМОВ, В. С. МАКАРОВ, Г. В. ЗАХАРКИН,
Д. Л. БОГАЧЕВ, Д. М. РУМЯНЦЕВ, С. А. АНТОНЕНКО

КАМЕРА-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТА

Рассматривается оптоэлектронный прибор, предназначенный для исследования минералогического состава различных типов грунта и, в частности, определения минералогического состава и структуры лунного грунта (реголита). Представлен используемый для решения поставленной задачи совмещенный метод спектрального и импульсного люминесцентного анализа на основе одного детектора.

Ключевые слова: оптический спектрометр, интерференционные фильтры, оптическая матрица, люминесцентный анализ, минералогический состав.

Введение. Минералогический состав грунта полярных областей Луны не исследовался посадочными аппаратами. В рамках текущих проектов „Луна-Глоб“ (запуск в 2015 г.) и „Луна-Ресурс“ (запуск в 2017 г.) предполагается проведение таких исследований. Для этих целей разработан прибор, позволяющий в окружающем посадочный аппарат пространстве рассмотреть значительную часть поверхности (на сотни метров вокруг посадочной станции). При небольшом поле зрения прибора это достигается путем механической развертки, поэтому могут быть исследованы значительные участки поверхности, а некоторые участки окружающего ландшафта, включая отдельно лежащие камни, расположенные вблизи (до 1...2 м), могут быть исследованы с очень высоким пространственным разрешением.

Методы исследования минералогического состава грунта в видимом диапазоне с помощью многополосного фотометра (или спектрометра) [1] и фотолюминесцентного анализа [2] используются достаточно давно как на Земле, так и в космосе. Тем не менее для исследования Луны совмещенный анализ не применялся. Как известно, люминесцентный анализ необычайно чувствителен. С его помощью можно обнаружить в пробе наличие вещества с концентрацией $\sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ г/г. Совместное применение двух методов расширяет возможности прибора в целом, что позволяет с высокой вероятностью по полученным спектрам восстановить истинный минералогический состав исследуемого грунта.

Создание прибора, реализующего методы фотометрического и фотолюминесцентного анализа [3], потребовало большого объема исследований по изучению возможности совмещения обоих методов в одном устройстве. Алгоритмы обработки и возможности их модификации тесно связаны с техническими требованиями, предъявляемыми к аппаратуре космического исполнения.

Аппаратное обеспечение прибора. В состав прибора (камеры-спектрометра), структурная схема которого представлена на рис. 1, входят оптическая головка, устройство двухосной развертки и устройства обработки и управления. В режиме работы по отраженному солнечному излучению качество спектрального изображения слабо зависит от дальности.

Оптическая головка камеры содержит:

- объектив с постоянным фокусным расстоянием, формирующий изображение в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ), соответствующее полю зрения $26 \times 26^\circ$;
- клиновидный интерференционный линейный фильтр, устанавливаемый перед входным окном ФПУ и ограничивающий поле зрения до $12 \times 26^\circ$;
- блок ФПУ с термоэлектрическим элементом Пельтье, выполняющий функцию термостабилизации ФПУ для снижения уровня шума;
- гибко-жесткую плату контроллера ФПУ, состоящую из платы управления и платы фотоприемника; в состав платы контроллера входит буферное ОЗУ для временного хранения кадров, полученных от ФПУ;
- модуль импульсной подсветки, выполненный на основе импульсного УФ-светодиода с оптическими элементами, для обеспечения равномерного распределения энергии в телесном угле, незначительно превышающем поле зрения камеры.

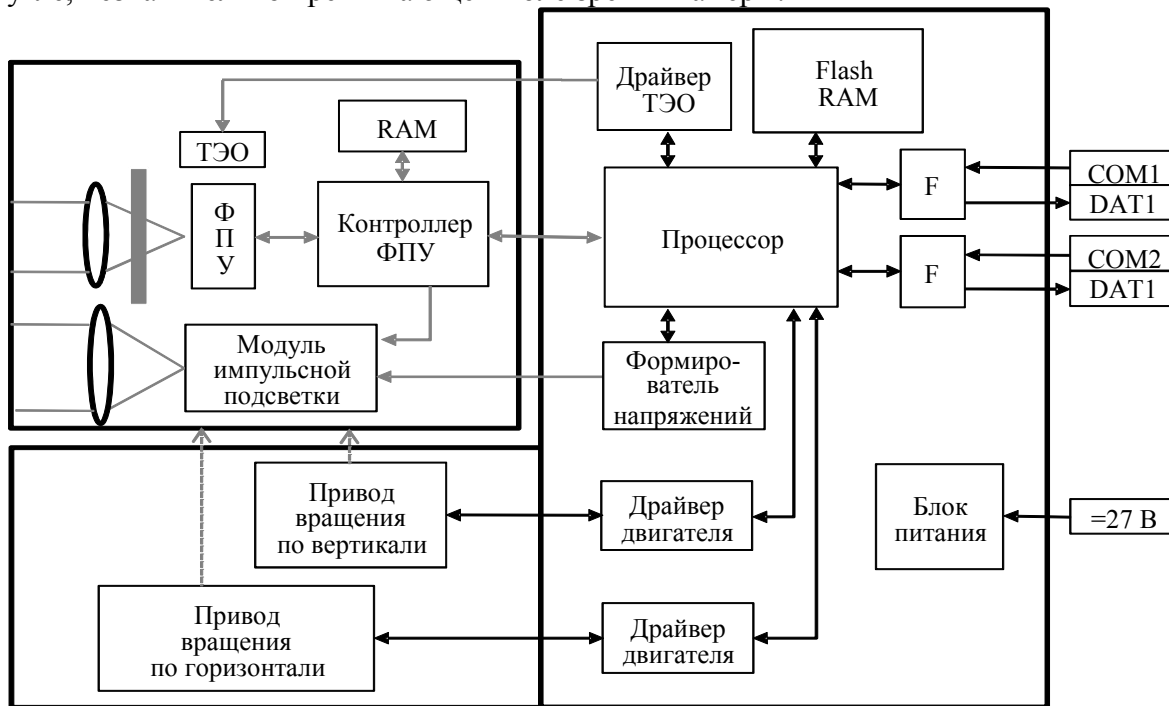


Рис. 1

Объектив должен иметь спектральный диапазон от 0,3 до 1,06 мкм, большую светосилу и высокую разрешающую способность. Для решения этой задачи в Национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург) был разработан и изготовлен принципиально новый объектив „ЛУНАР-1УФ“, оптическая схема которого приведена на рис. 2. Силовыми компонентами объектива являются одиночные положительные линзы, а коррекционными элементами — два склеенных мениска и специально примененная близфокальная линза. Фокусное расстояние объектива $F = 21,0$ мм,

угол поля зрения $2\omega=37^\circ$, относительное отверстие $D:f = 1:2,4$, что свидетельствует о его большой светосиле. Освещенность на краю поля изображения с учетом геометрического виньетирования составляет 0,73% от освещенности в центре поля. Абсолютная дисторсия объектива не превышает 0,01 мм. Измеренная визуальная разрешающая способность объектива в видимом диапазоне составляет примерно 500 лин/мм, что обеспечивает хорошее пространственное разрешение.

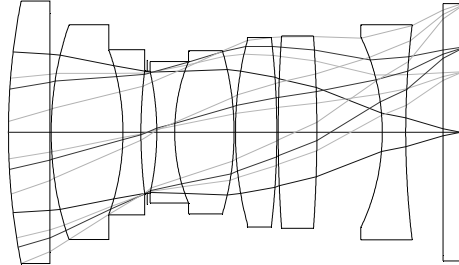


Рис. 2

Поскольку объектив работает в видимом, ближнем инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах хроматизм объектива исправляется сочетанием оптических материалов — кварца и флюорита. При этом хроматические aberrации корректируются в диапазоне от $\lambda_1=0,3$ мкм до $\lambda_2=1,06$ мкм с помощью двух склеенных менисков, где роль „флинтового“ материала выполняет кварц марки КУ. Близфокальная линза исправляет остаточный астигматизм и кривизну поля изображения.

При создании прибора особую сложность представляло размещение фильтра на матрице в связи с использованием достаточно большого поля зрения системы $12\times 26^\circ$. Эффективная пропускная способность клиновых интерференционных фильтров сильно зависит от угла падения лучей на их поверхность. Наилучшее качество достигается при перпендикулярном падении лучей, поэтому фильтр располагался максимально близко к поверхности. Были проведены расчеты зависимости параметров фильтра от угла падения лучей для различных длин волн. Поскольку каждая зона фильтра имеет угловой размер около $0,5^\circ$, понятно, что смещением центральной волны можно пренебречь или учесть его при калибровке, а пропускная способность полосового фильтра меняется незначительно.

Контроллер ФПУ, собранный на программируемой логической матрице (FPGA), представляет собой цифровой автомат, который формирует необходимые последовательности сигналов для запуска импульсного ультрафиолетового источника, получения кадров изображения от ФПУ с сохранением их в буферном ОЗУ и управления работой термоэлектрического элемента объектива (ТЭО).

Источник ультрафиолетового излучения конструктивно связан с оптической головкой. Поле излучения источника должно совпадать с полем зрения объектива или быть несколько большим. В качестве источника используются два ультрафиолетовых светодиода, которые включаются одновременно. Концентрация излучения светодиода обеспечивается несложной оптикой.

В состав прибора также входят (см. рис. 1):

- модуль в виде платы, на которой расположена вся электронная часть, включая процессор и блок питания;
- привод вращения оптической головки прибора по горизонтали, обеспечивающий установку оптической оси с погрешностью не более $6^\circ/1024\pm 20''$ в пределах угла поля зрения по горизонтали $\pm 70^\circ$;
- привод вращения оптической головки прибора по вертикали, обеспечивающий установку оптической оси с погрешностью не более $5^\circ/1024\pm 20''$ в пределах угла поля зрения по вертикали $\pm 25^\circ$.

Функционально узел двухосной платформы выделен на рис. 1, но конструктивно он связан с модулем управления камерой. Двухосная платформа представляет собой раму с двумя приводами. На выходах редукторов устанавливаются червячные пары для жесткой фиксации положения оптической головки. В приборе используются привод фирмы MAXON (Германия) и червячная пара специальной разработки для согласования угла поворота с полем зрения камеры.

Сигналы управляющих драйверов для двигателей приводов формируются с помощью двух таймеров, каждый из которых содержит три 16-разрядных счетчика. Таймеры вырабатывают трехфазные сигналы управления. Фаза сигналов определяется по импульсам датчиков Холла, встроенных в двигатели. Для определения крайних положений поворотной платформы прибора выделено 4 входа в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), которые могут быть подключены к концевым датчикам Холла или к микросхемам, измеряющим ток потребления двигателей, для установки платформы вплотную к упору. Такие усложнения конструкции обусловлены тем, что для качественной съемки панорамы желательно обеспечить точность позиционирования платформы не хуже $\pm 20''$.

Узел процессора построен на базе микросхемы ATSAM3N, производимой фирмой ATMEL (США). Данная микросхема представляет собой однокристалльный микропроцессор с 32-разрядным ядром CORTEX-M3, работающим на частоте 48 МГц, имеет ОЗУ (RAM) емкостью 24 Кбайт и ПЗУ (Flash) емкостью 256 Кбайт. Микросхема включает два таймера А и В. Все порты URT и SPI подключены к согласующим последовательным интерфейсам RS-485. Через шину данных PIO подключена внешняя Flash-память емкостью 1 Гбайт. Распределение внутренних ресурсов микросхемы производится при инициализации системы.

В качестве энергонезависимой памяти применена микросхема MT29F8G08ABABA фирмы "Micron Technology" (США), представляющая собой NAND Flash-память, выполненную по SLC-технологии со стандартным (ONFI) 8-разрядным интерфейсом управления. Микросхема имеет следующую организацию хранения данных:

- 8-битовая страница размером 4096+224 бит;
- блок, состоящий из 128 страниц (512 + 28 Кбит);
- 2 плана по 1024 блока.

Общая емкость микросхемы 8 Гбит. Минимальное время операции асинхронного ввода—вывода составляет 25 нс, что соответствует возможной частоте изменения выходной цепи при выполнении процессором команд изменения бита. Доступ к микросхеме памяти осуществляется через контроллер параллельного ввода—вывода (PIO) процессора. Управляющие сигналы формируются программно. Ожидаемое время записи или чтения байта составляет 200 нс.

Оптическая головка подключена к контроллеру SPI процессора с помощью интерфейса в виде двух дифференциальных каналов RS-485. При включении питания камеры загружается конфигурация ПЛИС-прибора, для этой операции по каналам передаются два сигнала — CLK и MOSI. Данные конфигурации передаются из встроенной Flash-памяти процессора с использованием контроллера прямого доступа к памяти (PDC). По окончании загрузки конфигурации процессор продолжает работу в режиме "Master", ПЛИС принимает команды и переключает приемопередатчик RS-485 (цепи MOSI/MISO) в режим передачи сигналов к процессору при выполнении команды чтения данных. Данные принимаются во встроенную память процессора (RAM) по строкам видеоизображения в режиме канала прямого доступа. Скорость передачи данных (0,2...48 Мбит/с) определяется настройками контроллера SPI.

Программно-алгоритмическое обеспечение прибора. Алгоритмы используются для решения следующих задач:

- съемка полной панорамы в трех спектральных полосах: синей — 460...590 нм; зеленой — 570...665 нм; красной — 660...780 нм;

— съемка спектра отраженного солнечного излучения в 50 спектральных диапазонах (от 278 до 1020 нм с шагом 12 нм) для фрагмента $X \times Y^\circ$,

— съемка спектра люминесценции, вызванной вспышкой импульсной УФ-лампы, в 50 спектральных диапазонах для фрагмента $X \times Y^\circ$.

Одиночный кадр изображения можно представить в виде множества полос, каждая из которых соответствует своему спектральному диапазону. Каждому пространственному полю зрения будут соответствовать 50 одиночных кадров. Число 50 определяется числом спектральных полос клинового фильтра.

Размер одиночного кадра спектра $50 \times 20 \times 330$ пкс. Погрешность наложения отдельных кадров по горизонтали не превышает 1 пкс. Совмещение по вертикали может быть осуществлено с большей погрешностью. Размер одиночного кадра по вертикали и горизонтали при необходимости может изменяться в зависимости от размера исследуемого объекта. Таким образом, один спектр будет состоять из 50 одиночных кадров в заданном пространственном угле. Непараллельность спектральных полос фильтра и строк ФПУ выравнивается с точностью 1 пкс. Механизм перемещения по горизонтали обеспечивает установку оптической оси камеры с точностью, также не превышающей угловой размер пиксела. Матрица развернута так, чтобы строки были расположены по вертикали, тогда номер строки определяет спектральный диапазон. Во время съемки панорамы данные будут суммироваться в окне размером 4×4 пкс в пределах спектральной полосы и сохраняться в памяти в виде набора сжатых спектральных полос. Такой режим сжатия информации необходим для получения RGB-панорамного изображения размером $140 \times 54^\circ$, для чего понадобится осуществить бортовую обработку суммированием спектральных полос всех спектров.

Режим съемки спектров во время проведения люминесцентного анализа аналогичен. Перед съемкой одиночного кадра включается УФ-вспышка, время задержки между окончанием вспышки и съемкой не более 1 мкс. Съемка одиночного кадра должна многократно повторяться для улучшения соотношения сигнал/шум. Количество повторных вспышек определяется расстоянием до исследуемого объекта.

Заключение. Рассмотренный в статье совмещенный метод, т.е. совместное применение спектрометрического и фотолюминесцентного анализа в видимом диапазоне, расширяет возможности разработанного прибора, что позволяет с высокой вероятностью по полученным спектрам восстановить истинный минералогический состав исследуемого грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабушкин А. А., Бажулин П. А., Королев Ф. А., Лившин Л. В., Прокофьев В. К., Стриганов А. Р. Методы спектрального анализа. М.: Изд-во МГУ, 1962.
2. Лившин В. Л. Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М.—Л.: Гостехиздат, 1951.
3. Каралис В. Н., Корнеева Э. А. Аппаратура для флуоресцентного анализа. М.: Наука, 1970.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Липатов** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: slip@iki.rssi.ru
- Алексей Павлович Экономов** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: alekonomo@yandex.ru
- Владислав Сергеевич Макаров** — Институт космических исследований РАН, Москва; ведущий специалист; E-mail: vmakarov@mx.iki.rssi.ru
- Геннадий Владимирович Захаркин** — ЗАО СП „Интеррастро“, Москва; ведущий специалист; E-mail: eslab@mail.ru
- Дмитрий Львович Богачев** — ОАО „НТЦ Завод Ленинец“, Санкт-Петербург; инженер-оптик; E-mail: dmitry@mail.ru

- Дмитрий Михайлович Румянцев* — УНПЦ „Руссар“, Санкт-Петербург; директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; E-mail: oda2606@yandex.com
- Сергей Анатольевич Антоненко* — ЗАО СП „Интеррастро“, Москва; ведущий специалист; E-mail: eslab@mail.ru

Рекомендована
Институтом космических
исследований РАН

Поступила в редакцию
19.04.13 г.

УДК 535.512

В. А. ТРОФИМОВ, Ю. Т. НАГИБИН, В. Т. ПРОКОПЕНКО, В. Т. УРАЗГАЛИЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЕКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ЭЛЛИПСА ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Исследован масштаб изображения проекционной картины эллипса поляризации при определении векторных характеристик светового пучка методом оптического гетеродинамирования. Приведены рекомендации по снижению влияния наблюдаемой зависимости на результаты измерений.

Ключевые слова: поляризация, оптическое гетеродинамирование, интерференционная картина, амплитудно-фазовые характеристики, фотоприемник.

Фотоэлектрическое преобразование световой волны при измерении параметров поляризации может быть осуществлено либо методом некогерентного (прямого) фотодетектирования, либо методом когерентного фотодетектирования (оптического гетеродинамирования) [1]. Некогерентное детектирование при регистрации интенсивности световой волны, прошедшей через определенным образом ориентированные оптические элементы, позволяет путем расчета определить параметры поляризации исследуемой световой волны. К достоинствам этого метода можно отнести простоту реализации измерительной схемы и отсутствие особых требований к когерентности источника излучения, а к недостаткам — невозможность регистрации фазовой информации в реальном масштабе времени.

Метод когерентного детектирования требует при регистрации информации пространственного совмещения информационного светового пучка с опорным, что обуславливает возникновение световых биений. При регистрации световых биений можно измерить амплитудно-фазовые характеристики световой волны в реальном масштабе времени.

Интенсивность светового пучка, представляющего собой результат суперпозиции двух (m, n) плоских квазимонохроматических волн, с учетом невозможности появления перекрестных или интерференционных членов между ортогональными составляющими можно представить выражением [2]

$$\langle I_j(r, t) \rangle = \left\langle \left[E_j^{m*}(r, t) + E_j^{n*}(r, t) \right] \left[E_j^m(r, t) + E_j^n(r, t) \right] \right\rangle, \quad j = x, y, \quad (1)$$

или иначе

$$\langle I_j(r, t) \rangle = \left\langle \left| E_j^m(r, t) \right|^2 + \left| E_j^n(r, t) \right|^2 \right\rangle + 2 \left[\langle E_j^m(r, t) \rangle \right]^{1/2} \left[\langle E_j^n(r, t) \rangle \right]^{1/2} \operatorname{Re}[\gamma_j(r, t)], \quad (2)$$

где $\gamma(r, t)$ — комплексная степень когерентности.