

УДК 535.243.2+681.7

Ю. В. Беляев, Л. В. Катковский, Ю. А. Крот, С. В. Хвалей, А. Д. Хомицевич

Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка
Білоруського державного університету, Мінськ, Білорусь

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Описуються вимірювання і оптимізація поля зору спектрометричного модуля фотоспектральної системи, що використовується на борту міжнародної космічної станції в рамках космічного експерименту «Ураган». Розглянуто модифіковану оптичну схему із зменшенням полем зору модуля спектрорадіометра в сагітальній площині, а також результати відносної прив'язки цього поля до поля зору модуля реєстрації зображень.

ВВЕДЕНИЕ

В результате реализации космического эксперимента «Ураган» на Международной космической станции (МКС) в период работы экспедиций МКС 8—МКС 13 на Землю доставлены десятки тысяч цифровых фотоизображений поверхности Земли. Получен огромный объем информации, широко освещенный в научной печати [6, 7, 9]. В развитие приборного обеспечения этих работ по заказу РКК «Энергия» (Россия) в Институте прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета совместно с Институтом географии РАН разработана и изготовлена фотоспектральная система (ФСС) для установки на Российском сегменте МКС.

Для съемки Земли из космоса на многих спутниках широко используются ориентированные на конкретные задачи линейные сканеры. Например, с 1986 г. на спутниках серий SPOT, с 1990 г. на индийских IRS-1C и -1D, на японских OPS (на JERS-1) и ASTER (на Terra); на американских коммерческих спутниках высокого разрешения IKONOS, QuickBird и OrbView-3. Линейные сканеры — одна из основных оптических технологий получения изображений, используемых на непилотируемых платформах.

Другая технология — это вращающиеся оптико-механические сканеры, используемые, например, на американских спутниках Landsat/TM, NOAA/AVHRR и Terra/MODIS [10].

Наконец, еще одна технология получения изображений основана на системах покадровой съемки. ФСС является системой съемки изображений и спектров для пилотируемой космонавтики и управляется оператором со всеми вытекающими отсюда преимуществами.

В качестве аналогов ФСС можно привести такие известные системы:

- цифровая камера ADS 40, предлагаемая компанией LH Systems [<http://www.lh-systems.com/products/ads40.html>], — высокопроизводительный цифровой сенсор, способный получать панхроматические, а также многоспектральные изображения в диапазоне 0.42—0.9 мкм;
- многоспектральная цифровая камера компании «SensyTech» (AA497 AMDC) — покадровый прибор с приблизительно 2000 пикселей по каждой из осей. Получение спектральных изображений обеспечивается оптическими фильтрами, помещенными в съемной турели [<http://www.sensytech.com/Imaging/adc.html>];
- цифровая камера Vexcel UltraCam-D — радиометрическое разрешение 12 бит на пиксель с высокой скоростью получения изображений [<http://www.vexcel.com/products/ultracam.html>].

Однако не существует полных прототипов созданной системы ФСС, которая по своей информативности (с учетом разработанной методики совместной обработки спектров и изображений [4]) обладает свойствами видеоспектрометра. ФСС предназначена для регистрации спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 350—1050 нм, пространственно «привязанных» к цветным изображениям высокого пространственного разрешения. ФСС конструктивно выполнена в виде компактного переносного моноблока, который включает в свой состав модуль спектрорадиометра (МС), модуль регистрации изображения (МРИ) и модуль электроники (МЭ) [1, 3].

Важным этапом при создании оптико-электронной аппаратуры является точное определение ее спектрально-энергетических и угловых характеристик.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА

Важной характеристикой спектральной аппаратуры является поле зрения прибора. В плоскости, перпендикулярной к линии входной щели (меридиональной плоскости) полихроматора угол поля зрения определяется из двух параметров: фокусное расстояние входного объектива и ширина входной щели. Для измерения угла поля зрения в сагиттальной плоскости была изготовлена установка, позволяющая жестко закрепить прибор и измерять малые углы его поворота. В качестве источника излучения был использован монохроматический излучатель метрологического комплекса «Камелия-М». Излучение выходящее из выходной щели монохроматора коллимируется сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 1.5 м. В параллельный пучок излучения устанавливается исследуемый спектрорадиометр ФСС на поворотном устройстве со шкалой отсчёта угла поворота таким образом, чтобы изображение выходной щели монохроматора было перпендикулярно к входной щели полихроматора МС ФСС. Было проведено измерение угла поля зрения МС в сагиттальной плоскости, величина которого составила более 2° [2, 5].

КОМПЕНСАЦИЯ АСТИГМАТИЗМА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ПОЛИХРОМАТОРА МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Для первоначальных значений углов поля зрения полихроматора модуля спектрорадиометра линейные размеры спектрометрируемого участка земной поверхности с высоты орбиты 400 км составляют 0.237×13.96 км. Возникла необходимость уменьшить угол поля зрения полихроматора модуля спектрорадиометра в сагиттальной плоскости.

Был проанализирован ряд оптических схем по уменьшению астигматического действия вогнутых сферических дифракционных решеток, однако предложенные методы приводят к существенному увеличению габаритов полихроматора МС.

Для решения проблемы был проанализирован ход световых лучей внутри полихроматора и природа появления астигматизма в полихроматорах с вогнутыми дифракционными решетками [8]. На основе данного анализа было найдено решение, которое не требовало кардинального изменения оптической схемы — установка цилиндрического вспомогательного зеркала после дифракционной решетки вместо плоского. Задача данного зеркала «подфокусировать» световые лучи в сагиттальной плоскости на светочувствительную поверхность приемника излучения.

Расчет радиуса кривизны вспомогательного цилиндрического зеркала в сходящемся пучке — достаточно трудоемкая задача. Для проведения данного расчета была использована среда моделирования оптических систем «Code V». Применение данного пакета позволило провести ряд численных экспериментов для нахождения наиболее оптимального решения.

Смоделирована ситуация плоского вспомогательного зеркала. Так как величина астигматизма зависит от угла дифракции, то компенсация астигматизма различна для различных длин волн рабочего спектрального диапазона. Было рассчитано, что для полной компенсации астигматизма для излучения длины волны 700 нм — центра рабочего спектрального диапазона, радиус кривизны цилиндрического зеркала

должен составлять 716 мм. К тому же следует заметить, что компенсация астигматизма приводит к увеличению интенсивности излучения в плоскости приемника, что приводит к возрастанию чувствительности модуля спектрорадиометра в данной спектральной зоне — зоне действия наибольшей компенсации астигматизма. Проанализировав относительную спектральную чувствительность приемника излучения и зарегистрированный отклик прибора на излучение диффузного излучателя метрологического комплекса, было предложено сместить наибольшую компенсацию астигматизма дифракционной решетки в ИК-область спектра — 900 нм. Это решение позволило увеличить спектральную чувствительность МС в ИК-области — области наименьшей чувствительности приемника излучения. Радиус кривизны вспомогательного цилиндрического зеркала составил 650 мм. При этом величина астигматического отрезка для излучения с длиной волны 350 нм (начало рабочего спектрального диапазона) составила 3.5 мм, что соответствует углу поля зрения в 1° в сагиттальной плоскости, что вписывается в требование технического задания.

После анализа результатов моделирования установка вспомогательного цилиндрического зеркала с радиусом кривизны 650 мм была признана оптимальным решением для задач, возложенных на научную аппаратуру (НА) ФСС. Было изготовлено три экземпляра вспомогательных цилиндрических зеркал для опытного и двух рабочих образцов НА ФСС. Изготовленные элементы были установлены на образцы МС ФСС.

После установки вспомогательного цилиндрического зеркала были проведены прямые измерения поля зрения МС в сагиттальной плоскости. Использование цилиндрического зеркала позволило уменьшить угол поля зрения МС в сагиттальной плоскости до менее чем 1° . Этот угол поля зрения соответствует линейным размерам на поверхности Земли в 6.98 км. Таким образом, углы поля зрения МС составляют $0.034 \times 1.0^\circ$. Тогда спектрометрируемый участок земной поверхности будет иметь линейные размеры 0.237×6.98 км.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРИВЯЗКА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА К ПОЛЮ ЗРЕНИЯ МОДУЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

При получении с помощью НА ФСС спектров излучения, отраженного от подстилающей поверхности, необходимо не только знать геометрические размеры поля зрения МС, но и точно выделять эту область на снимке [3].

Привязку поля зрения МС к кадру МРИ можно выполнить только по удаленному контрастному объекту, чтобы на точность привязки не повлиял параллакс. Имея удаленный контрастный объект, задача привязки сводится к определению границ поля зрения МС в поле зрения МРИ. Кроме того, было необходимо вывести поле зрения МС в центр поля зрения МРИ, так как для оператора для быстрого наведения на интересующий объект наиболее удобно будет работать с НА ФСС при условии, что поле зрения спектрорадиометра центрировано в поле зрения МРИ. Как и для определения угла поля зрения МС, в качестве источника излучения выступала выходная щель монохроматического излучателя, расположенная в фокусе коллиматорного зеркала. При этом диаметр коллиматорного зеркала достаточен для одновременного размещения в параллельном световом пучке объективов МС и МРИ. Таким образом, с помощью НА ФСС регистрируется бесконечно удаленное изображение выходной щели монохроматического излучателя. Поворотом всей системы были определены положения границ поля зрения МС в кадре МРИ. Затем с помощью юстировочных винтов поле зрения МС было выведено в центр кадра МРИ. Определение границ поля зрения МС сопровождалось появлением сигнала от приемника излучения МС при попадании в данное поле зрения выходной щели монохроматического излучателя [3].

На основе спектрально-угловых характеристик НА ФСС и возможностей специального программного обеспечения разработан ряд способов и методов съемок с помощью данной системы. НА ФСС предполагает два режима съемки: «одиночный кадр» и «трассовая съемка». В режиме «одиночный кадр» снимается одно изображение и три связанных с ним спектра с разных

частей (площадок) кадра при условии, что ось ФСС неподвижна относительно движущейся по орбите МКС. В режиме «трассовая съемка» снимается заданная последовательность изображений и три спектра на каждое изображение. С учетом движения МКС перекрытие соседних кадров составляет 10–30 % [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа по разработке и реализации способа устранения астигматического эффекта привела к существенному уменьшению поля зрения модуля спектро радиометра в сагиттальной плоскости до 1.0° , что показывает эффективность применения вспомогательного цилиндрического зеркала для устранения астигматических эффектов.

В результате юстировок оптических осей двух модулей определено и скорректировано относительное взаиморасположение центров полей зрения МС и МРИ.

Исходя из параметров и возможностей НА ФСС, разработаны режимы и способы съемок при проведении космических экспериментов по оптической диагностике различных подстилающих поверхностей.

1. *Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Домарацкий А. В. и др.* Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 2. — С. 41–48.
2. *Беляев Б. И., Веллер В. В., Домарацкий А. В. и др.* Фотоспектральная система для исследования подстилающих поверхностей с борта МКС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тез. докл. VII Всероссийской откр. конф., Москва, 16–20 ноября 2009 г. [Электронный ресурс]. — М.: ИКИ РАН РФ, 2009. — (<http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=1844>).
3. *Беляев Б. И., Домарацкий А. В., Крот Ю. А. и др.* Фотоспектральная система для Международной Космической Станции, задачи и методы съемок // Информационные технологии, электронные приборы и системы: Сб. тез. Междунар. научно-практ. конф.

- ITEDS'2010, Минск, 6–7 апреля 2010 г. — Минск, БГУ, 2010. — Т. 2. — С. 11–15.
4. *Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалей С. В., Хомицевич А. Д.* Повышение информативности изображений растительных объектов с использованием спектральных данных // Журн. прикладной спектроскопии. — 2007. — **74**, № 5. — С. 670–676.
 5. *Беляев Б. И., Крот Ю. А., Нестерович Э. И. и др.* Фотоспектральная система дистанционного зондирования земли с борта МКС // Четвертый Белорусский космический конгресс: Матер. конгресса, Минск, 27–29 октября 2009 г. — Минск, 2009. — Т. 2 — С. 30–35.
 6. *Десинов Л. В., Беляев М. Ю., Шарипов С. Ш. и др.* Мониторинг природных катастроф с МКС в 2005 году // Сб. тез. Третьей всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14–17 ноября 2005 г. — (<http://smis.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=415>).
 7. *Десинов Л. В., Ведешин Л. Н.* Программа «Ураган» стремиться к интеграции с ГИС [Текст] // ArcReview. — 2003. — № 3 (26). — (http://www.dataplus.ru/Arcrev/Number_26/13_uragan.htm).
 8. *Лебедева В. В.* Техника оптической спектроскопии. — М.: Изд-во МГУ, 1986. — 352 с.
 9. *Побединская М.* «Ураган» предупредит об ураганах и других природных катастрофах // Новости космонавтики. — 2003. — № 2. — (<http://www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/241/35.shtml>).
 10. *Airborne Pushbroom Line Scanners: An Alternative to Digital Frame Cameras* // GEOinformatics. — 2005. — Januari/Februari. — P. 50–57. — (<http://www.geoinformatics.com>).

Надійшла до редакції 17.12.10

*Yu.V. Belyaev, L.V. Katkovsky, Yu.A. Krot,
S.V. Khvalei, A.D. Khomitsevich*

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PHOTOSPECTRAL SYSTEM ANGULAR CHARACTERISTICS

We describe the analysis and optimization of angular characteristics of the photospectral system which is in current use onboard the International Space Station within the framework of the space experiment «Uragan». The results of our investigation of the spectrometer field-of-view angular characteristics and of field-of-view angle reducing in sagittal plane are given. Our results for positioning of the spectrometer unit field of view relative to the image registration unit field of view are discussed.