

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.315 + 681.7.065

## РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2013 г. С. А. Архипов\*, канд. техн. наук; В. И. Заварзин\*\*, доктор техн. наук;  
Б. Н. Сеник\*, доктор техн. наук

\* Федеральный научно-производственный центр “Красногорский завод им. С.А. Зверева”,  
г. Красногорск, Московская обл.

\*\* Московский государственный технический университет им. Н.Э Баумана, Москва

E-mail: bogdan\_senik@mail.ru

Приведены конкретные примеры изготовления высококачественных апохроматических объективов “АПО Зенит-ГЛ”, “АПО Зенит-ГЦ”, используемых в оптико-электронных комплексах космического назначения “Гамма-Л”, “Гамма-Ц”, а также конструкция высокоточного спектроделительного призмного модуля.

Рассматривается также использование компактных зеркально-линзовых оптических систем с эксцентрично расположенными полями изображения, что в свою очередь, позволит обеспечить существенное снижение массы аппаратуры и создаст принципиально новый класс компактных систем дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, оптическая система, гиперспектральная съемочная аппаратура, диспергирующее устройство.

Коды OCIS: 220.4610, 310.1620

Поступила в редакцию 07.09.2012

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса является одним из основных методов изучения окружающей среды, например, при решении многих задач геологии, в том числе при поиске месторождений полезных ископаемых и подземных вод, для контроля состояния почв, мониторинга сельскохозяйственных угодий и лесов, изучения динамики агломераций и населенных пунктов, контроля глобальных атмосферных изменений, а также для экологического мониторинга, технической разведки в интересах министерств по чрезвычайным ситуациям и обороны.

Сегодня Красногорский завод им. С.А. Зверева разрабатывает и изготавливает аппаратуру ДЗЗ нового поколения с существенным повышением информативности (пространственного и спектрального разрешения, регистрации всего спектра оптического излучения от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной (ИК) области). Создается принци-

пиально новый приборный ряд – гиперспектральная аппаратура (ГСА) ДЗЗ. Космическая оптико-электронная съемка Земли имеет главное преимущество – оперативное получение изображений любой части ее поверхности. Кроме того, гиперспектральная съемка позволяет получать изображения одного и того же сюжета в сотнях спектральных диапазонов, появляется возможность идентификации объектов не только по геометрической форме, но и по их спектральным сигнатурам. Характерная, обязательная черта современной и перспективной аппаратуры данного класса – ее высокие радиометрические, фотограмметрические, спектрометрические измерительные характеристики, которые после приемо-сдаточных испытаний изделия проходят обязательный этап калибровки. Активные работы в этом направлении начаты в рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию съемочной оптико-электронной аппаратуры “Гамма” для мало-

го космического аппарата (КА) “Монитор-Э” и продолжают во всех дальнейших проектах [1–3].

Важнейшим элементом оптико-электронной ГСА ДЗЗ, формирующим изображение объектов и напрямую влияющим на качество видеoinформации, является объектив. В рамках работ по программе “Гамма” проведен комплекс работ, включающий расчет и оптимизацию оптических систем, разработку конструкторской документации (КД) и изготовление двух апохроматических объективов (главный конструктор объективов – А.А. Токарев) “АПО Зенит-ГЛ” и “АПО Зенит-ГЦ”, внешний вид которых приведен на рис. 1, 2, характеристики приведены в таблице. Оба объектива имеют высокое качество коррекции всех aberrаций [4].

Совершенная коррекция монохроматических и хроматических aberrаций позволила обеспечить технологический запас их изготовления. Снижение коэффициента передачи модуляций объективов по всему полю изображения не превысило 5% от расчетных значений, что обусловлено только остаточными хроматическими aberrациями. Дальнейшими тенденциями в рефрактометрическом объективостроении для данного класса аппаратуры авторам статьи представляются расширение рабочих спектральных диапазонов от 0,4 до 2,5 мкм, повышение выходных оптических и светотехнических параметров на 15–20%, минимизация массогабаритных характеристик на 25–30% по сравнению с ранее применяемыми схемами в аналогичных оптико-электронных приборах.

Поставленные задачи требуют целого ряда решений по конструкторскому и технологическому переделу. В первую очередь необходимо использовать оптические материалы с вы-

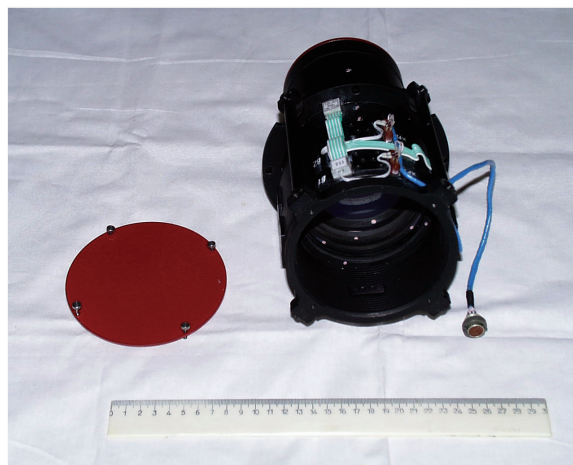


Рис. 1. Объектив АПО Зенит-ГЛ, предназначенный для использования в панхроматической съемочной аппаратуре “Гамма-Л” для малого КА “Монитор-Э”.



Рис. 2. Объектив АПО Зенит-ГЦ, предназначенный для использования в панхроматической съемочной аппаратуре “Гамма-Ц” для малого КА “Монитор-Э”.

#### Характеристики объективов АПО Зенит-ГЛ и АПО Зенит-ГЦ

Характеристики	АПО Зенит-ГЛ	АПО Зенит-ГЦ
Фокусное расстояние, мм	480	192
Геометрическое относительное отверстие	1:6,3	1:4,8
Угловое поле, град	10	17
Пропускание не менее, %	75	75
Расчетная дисторсия не более, %	0,2	0,05 для средней длины волны в каждом спектральном диапазоне
Спектральный диапазон, мкм	0,54–0,9	0,5–0,9
Коэффициент светорассеяния не более	0,04	0,04
Масса объектива, кг	4,5	1,5

сокими значениями показателя преломления в совокупности с обязательным высокоточным ( $\pm 1 \times 10^{-6}$ ) определением как показателей преломления, так и дисперсии не менее чем по 20-ти точкам рабочего спектрального диапазона с равномерной разбивкой шага по всему спектру. При изготовлении оптических элементов необходимы высокая точность по геометрии (отступление от заданных геометрических поверхностей не более 0,1 мкм) и шероховатости оптических поверхностей (в пределах 20 нм). Расчет, изготовление и нанесение высококачественных просветляющих покрытий должны обеспечивать минимальные коэффициенты остаточного отражения по всему рабочему диапазону спектра в пределах 1–1,5% в спектральном диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм.

В то же время, требования к перспективным оптическим системам (ОС) для аппаратуры ДЗЗ весьма противоречивы. С одной стороны, требуется увеличение светосилы и углового поля, что при сохранении фокусных расстояний, а также сохранении или улучшении массогабаритных характеристик, приводит к необходимости увеличения диаметров оптических компонентов. С другой стороны, необходимо снижать себестоимость изготовления и повышать эксплуатационные параметры комплексов. Ключ к разрешению вышеуказанных противоречий – создание новых широкоугольных малокомпонентных ОС, обеспечивающих существенное снижение массы аппаратуры, что позволит создать принципиально новый класс компактных изображающих систем.

Несмотря на значительные преимущества линзовых систем перед зеркальными и зеркально-линзовыми в части меньшего светорассеяния, эффективности защиты от паразитных засветок, разработчики вынуждены обращать внимание на возможность применения зеркальных и зеркально-линзовых систем. Чисто зеркальные системы применяют редко из-за слабых коррекционных возможностей. Наиболее актуальной задачей при разработке таких объективов является снижение коэффициента центрального экранирования, и как следствие, повышение значений функции передачи модуляции на средних пространственных частотах, являющихся рабочими для приемников ПЗС. Выход – в использовании центрированных зеркальных и зеркально-линзовых ОС с эксцентрично расположенным относительно оптической оси полем изображения. В таких систе-

мах за счет использования только наклонных пучков лучей удается избежать центрального экранирования.

Кроме того, они создают возможность увеличения углового поля, отсутствие центрального экранирования позволяет, в сравнении с классическими осесимметричными схемами, обеспечить более равномерное по полю качество изображения. В таких ОС угловое поле в пространстве изображения расположено на некотором расстоянии относительно оптической оси и имеет кольцевую форму.

В ходе проведенных теоретических исследований сделан сравнительный анализ различных схемных решений и их предельных характеристик, выбраны и обоснованы три новые схемы зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным относительно оптической оси полем изображения. Для них разработаны методики габаритного и абберрационного расчетов и рассчитаны зеркально-линзовые объективы со сферическими поверхностями, имеющие высокую степень исправления абберраций, в том числе дисторсии и хроматических абберраций в видимой и ближней ИК области спектра.

Объективы предназначены для получения изображения подстилающей поверхности Земли в видимой и ближней ИК областях спектра. Их пропускание в рабочей области не менее 75% при неоднородности спектрального пропускания не более 15%. Объективы имеют ход лучей в пространстве изображений, близкий к телецентрическому. При фокусном расстоянии 100 мм, относительных отверстиях 1:11–1:6, угловом поле в меридиональном сечении 0,45 и сагиттальном сечении 3,12° объективы имеют сферическую абберрацию не более 0,07 мм, дисторсию не более 0,8%.

Созданные схемные решения зеркально-линзовых объективов могут быть использованы в разработках аппаратуры ДЗЗ и открывают новые возможности, отличающиеся от действующих более высокой эффективностью (меньшим отношением стоимости единицы информации к затратам на проект).

Наряду с уже достигнутыми предельными пространственными информационными характеристиками (полоса захвата, пространственное разрешение, точность фотограмметрической привязки) современная аппаратура должна обеспечивать высокие радиометрические характеристики и спектральное разрешение. Поэтому кроме основного традиционного элемента оп-

тической системы – объектива, важной составной частью современной аппаратуры является модуль диспергирующего устройства, так как именно он осуществляет разложение излучения сложного спектрального состава в спектр.

Среди известных диспергирующих устройств (дисперсионные призмы, дифракционные решетки, светофильтры, фурье-интерферометры и др.) для космической аппаратуры дистанционного наблюдения и топографической аппаратуры существенные преимущества имеют призмные спектроделительные устройства на основе интерференционных фильтров. Такие устройства создают возможность апертурного спектрального деления входного излучения на несколько (3–6) спектральных каналов, что позволяет одновременно регистрировать один и тот же сюжет в нескольких спектральных диапазонах при идентичных условиях съемки, повышая тем самым достоверность радиометрической информации. Они формируют резкие границы спектральных каналов и имеют минимальное отношение сигнал/шум, что уменьшает радиометрические погрешности и существенно для приемников ПЗС. Призмные спектроделительные устройства на основе интерференционных фильтров имеют возможность аппаратного фотограмметрического совмещения “пиксел в пиксел” изображений в спектральных каналах, что повышает точность фотограмметрической привязки информации. С их помощью осуществляется спектральное деление в сходящихся световых пучках, что упрощает оптическую схему и снижает массогабаритные характеристики космической аппаратуры.

Эти преимущества могут реализоваться лишь с использованием высокоточных призмных и спектроделительных модулей, путем разработки и промышленного освоения современных технологий изготовления прецизионных призм, неравнотолщинных интерференционных фильтров, сборки и юстировки призмных оптических блоков.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов С.А., Потелов В.В., Сеник Б.Н.* Особенности технологии изготовления высокоточных оптических призмных узлов и спектроделительных модулей для изделий с высокой пространственной ориентацией // *Оптический журнал.* 2004. Т. 71. № 12. С. 11–13.

В рамках ОКР “Гамма” Красногорский завод им. С.А. Зверева выполнил комплекс конструкторских, технологических работ по изготовлению спектроделительного модуля.

Конструктивно спектроделительный модуль обеспечивает возможность получения информации в спектральном диапазоне 400–1100 нм и апертурного деления входного излучения на 3 спектральных канала. Это позволяет регистрировать один и тот же сюжет в нескольких спектральных диапазонах при идентичных условиях съемки, повышая тем самым достоверность радиометрической привязки, возможность спектрального деления в сходящихся световых пучках.

Изготовление такого класса спектроделительных модулей, в свою очередь, потребовало решения технологических задач изготовления высокоточных призмных элементов с точностью изготовления по плоскостности не более 15 нм, шероховатости не более 5 Å, с точностью по углам не более 2–3”; промышленного внедрения технологии нанесения прецизионных спектроделительных покрытий для конкретных спектральных диапазонов; внедрения методов склеивания спектроделительных модулей с ориентацией отдельных оптических компонентов друг относительно друга с точностью в пределах 2–3”.

## Заключение

Новые схемные решения малогабаритных объективов, разработанные технологии изготовления прецизионных призм, оптических фильтров, сборки и юстировки высокоточных спектроделительных модулей открывают новые возможности создания аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса, выгодно отличающиеся от существующих повышением оптических и эксплуатационных параметров, меньшими затратами на разработку и изготовление оптико-электронных комплексов.

2. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Свет, 1997. 129 с.
  3. *Кравцова В.И.* Дистанционное зондирование Земли в первой четверти XXI в. М.: ГИС-ассоциация, 2002. Информационный бюллетень. № 3. 48 с.
  4. *Токарев А.А.* Длиннофокусные объективы с эксцентрично расположенным полем изображения // Известия высших учебных заведений. Т. XXXI. № 7. С. 74–78.
-