

АПОХРОМАТИЧЕСКИЕ ТЕРМОНЕРАССТРАИВАЕМЫЕ ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2013 г. О. В. Понин*; Л. Н. Архипова**; Е. А. Демидова**, канд. техн. наук;
В. В. Тарабукин**, канд. техн. наук; А. А. Шаров, канд. техн. наук*

* Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

** Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт
им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: lastro@lzos.ru, lnarchipova@mail.ru

Разработаны объективы, обладающие апохроматической коррекцией аберраций в широком спектральном диапазоне, которая достигается применением стекол специальных марок – особых кронов и особых флинтов. Пассивная термонерасстраиваемость оптических систем обеспечена выбором комбинаций оптических сил линз и термооптических характеристик стекла.

Ключевые слова: объектив, мультиспектральная съемка, апохроматическая коррекция, функция передачи модуляции.

Коды OCIS: 220.0220, 220.3620

Поступила в редакцию 30.07.2012

Современные оптико-электронные комплексы дистанционного зондирования Земли оснащаются аппаратурой, обеспечивающей возможность проведения мультиспектральной съемки в широкой полосе захвата.

В частности, в комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата “Ресурс П” входят две съемочные камеры с различными углами обзора, в каждой из которых применяются оптико-электронные преобразователи, чувствительные в пяти различных спектральных интервалах, занимающих диапазон спектра от 0,41 до 0,90 мкм, т. е. рабочий спектральный диапазон включает как видимую, так и ближнюю инфракрасную область.

Для обеспечения высокого качества изображения при работе в широком спектральном диапазоне необходима апохроматическая коррекция оптической системы. Особенно важную роль она играет в случае проведения мультиспектральной съемки, для которой необходимо гарантировать единство положения плоскости наилучшей установки в нескольких спектральных интервалах (0,41–0,7, 0,41–0,51, 0,51–0,58, 0,6–0,7, 0,7–0,9 мкм) при условии сохранения одинаково высокого качества изображения в каждом из них.

Кроме широкого спектрального диапазона аппарата должна обладать достаточно высокой чувствительностью, что обуславливает применение объективов с относительно высоким относительным отверстием (1:3–1:4).

Существенным требованием также является обеспечение термонерасстраиваемости системы в интервале температур $\Delta t = \pm 15^\circ\text{C}$ от номинала $t = 20^\circ\text{C}$, т. е. в отсутствие внутренних механических подвижек отдельных элементов оптико-электронной системы в эксплуатационном диапазоне температур должно обеспечиваться единство плоскости наилучшего изображения (ПНИ) и сохранение качества изображения. Таким образом, помимо исправления всех традиционных аберраций в оптической системе необходимо за счет подбора оптических и конструкционных материалов обеспечить пассивную термонерасстраиваемость.

Также предъявляются жесткие требования к ортоскопичности (дисторсия в пределах всего поля не должна превышать 0,25%) и к телецентричности хода главных лучей в пространстве изображений.

Для широкозахватной мультиспектральной камеры разработаны новые оптические схемы короткофокусного (фокусное расстояние $f' = 40$ мм) и среднефокусного ($f' = 200$ мм) объективов.

Таблица 1. Оптотехнические и габаритные характеристики короткофокусного и среднефокусного объективов

| Характеристики объективов | Короткофокусный | Среднефокусный |
|----------------------------------|-----------------|----------------|
| фокусное расстояние, мм | 40 | 200 |
| относительное отверстие | 1:4 | 1:3 |
| угловое поле (2ω), град | 60 | 13 |
| спектральный диапазон, мкм | 0,41–0,9 | 0,41–0,9 |
| количество линз | 11 | 10 |
| длина, мм | 114 | 228 |
| задний отрезок, мм | 78 | 42 |

Тонкая коррекция термооптических аберраций и температурной дефокусировки осуществляется подбором сочетания температурных коэффициентов линейного расширения оправ линз и корпуса объектива. В табл. 1 приведены характеристики этих объективов.

К короткофокусному широкоугольному объективу предъявляется ряд требований: апохроматичности, ортоскопичности, телецентричности, и, наконец, заданного перепада освещенностей, что может быть реализовано только в оптической системе ретрофокусного объектива (обратного телеобъектива) [1].

Схема выполнена из двух четко выраженных частей – головной, содержащей положительные и отрицательные мениски (4 линзы) и предназначенной для исправления аберраций узких полевых пучков, и силового компонента (7 линз), развивающего относительное отверстие и исправляющего аберрации широких наклонных пучков. В объективе практически отсутствует геометрическое виньетирование, что обеспечивает требуемую равномерность освещенности по полю (табл. 2).

Применение стекол с особым ходом дисперсии, в частности, наилучшего на сегодняшний день материала для решения поставленной задачи – фторфосфатного крона марки ОК4, позволяющего получить апохроматическую коррекцию системы объектива с $f' = 40$ мм (вторичный спектр в диапазоне 0,41–0,9 мкм

составляет $0,000625f'$), вступает в противоречие с условием термонерасстраиваемости, поскольку данный материал имеет высокий температурный коэффициент показателя преломления. Учитывая, что для соблюдения условия ахроматизации линзы из стекла ОК4 должны быть положительными, система получается чувствительной к изменению температуры.

В разработанном короткофокусном объективе эта проблема решена введением в систему дополнительных отрицательных компонентов, также изготовленных из стекла ОК4, а кроме того, использованием стекол ТВФ4, СТК19, ТК23, имеющих специфические термооптические характеристики. Изменение оптической силы данных компонентов за счет изменения показателя преломления при колебаниях температуры позволяет скомпенсировать соответствующее изменение оптической силы положительных компонентов из того же материала. Введение отрицательных компонентов решает еще одну задачу – делает систему близкой к телецентрической, что, в частности, создает возможность установки интерференционных светофильтров в рабочем отрезке объектива, так как угол падения лучей на чувствительную плоскость матрицы составляет не более 12° .

Уровень расчетного качества изображения, создаваемого короткофокусным объективом ($f' = 40$ мм), который оценивается коэффициентом передачи контраста (КПК) по всем спектральным диапазонам, представлен на рис. 1. Из рисунка видно, минимальный уровень качества определяет край углового поля ($2\omega = 60^\circ$) в спектральном диапазоне 0,41–0,7 мкм, на пространственной частоте 100 мм^{-1} – значение КПК $T = 0,3$, в остальных, более узких спек-

Таблица 2. Падение освещенности E'/E'_0 по угловому полю короткофокусного объектива

| | | | | |
|-----------------|-----|-----|------|-------|
| ω , град | 15 | 21 | 26,4 | 29,84 |
| E'/E'_0 | 0,8 | 0,7 | 0,58 | 0,48 |

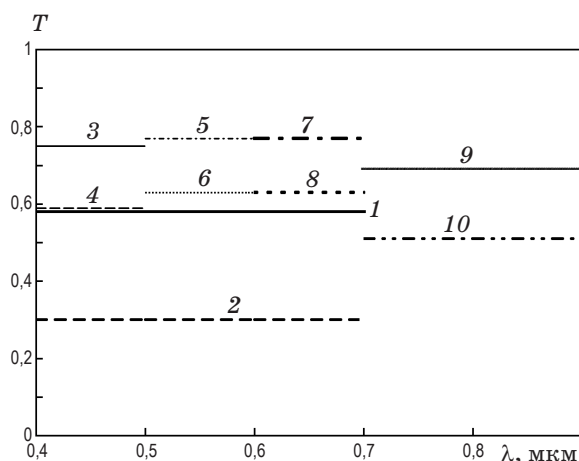


Рис. 1. Расчетный уровень полихроматического значения КПК в единой ПНИ короткофокусного объектива на пространственной частоте 100 мм^{-1} для основного канала ($\Delta\lambda = 0,41\text{--}0,7 \text{ мкм}$) — 1 (центр), 2 (поле) и на пространственной частоте 50 мм^{-1} для дополнительных каналов ($\Delta\lambda = 0,41\text{--}0,51 \text{ мкм}$ — 3 (центр), 4 (поле); $\Delta\lambda = 0,51\text{--}0,58 \text{ мкм}$ — 5 (центр), 6 (поле); $\Delta\lambda = 0,6\text{--}0,7 \text{ мкм}$ — 7 (центр), 8 (поле); $\Delta\lambda = 0,7\text{--}0,9 \text{ мкм}$ — 9 (центр), 10 (поле)).

тральных поддиапазонах на частоте 50 мм^{-1} значение КПК не ниже 0,51.

В температурном интервале от 5 до 35°C термооптическая aberrация положения, определяемая только использованными оптическими стеклами и алюминиевым сплавом для изготовления корпуса, составляет $+0,006 \div -0,010 \text{ мм}$. Однако, остаточная термоабerrация приводит к падению КПК в некоторых точках поля до 0,24–0,15. Для компенсации температурного смещения ПНИ системы в задний отрезок на длину около 20 мм (весь отрезок составляет примерно 66 мм) введен капролон, имеющий высокий коэффициент линейного расширения. Тогда в анализируемом спектральном диапазоне значение КПК на частотах 50 и 100 мм^{-1} сохраняется практически постоянным при изменении температуры, а не падает ниже расчетного минимума (для актиничного потока $p_\lambda = 1$ и $\Delta\lambda = 0,486\text{--}0,656 \text{ мкм}$) (табл. 3).

В среднефокусном объективе ($f' = 200 \text{ мм}$) для коррекции вторичного спектра (остаточная величина вторичного спектра в диапазоне 0,4–0,9 мкм составляет $0,0003f'$) и минимизации термооптической aberrации положения были выбраны стекла марок ОФ4, ТК14, ТФ5.

Расчетный уровень качества изображения, а именно значение полихроматических КПК на частоте 100 мм^{-1} в диапазоне 0,41–0,7 мкм

и на частоте 50 мм^{-1} в четырех поддиапазонах 0,41–0,51, 0,51–0,58, 0,6–0,7, 0,7–0,9 мкм объектива $f' = 200 \text{ мм}$, приведен на рис. 2.

Как видно из графика, минимальный уровень качества изображения определяет край поля зрения в диапазоне 0,41–0,7 мкм (на пространственной частоте $N = 100 \text{ мм}^{-1}$ — $T = 0,44$), в остальных, более узких спектральных диапазонах КПК составляет не менее 0,5 на пространственной частоте 50 мм^{-1} .

При изменении температуры на $\pm 15^\circ\text{C}$ относительно 20°C и изготовлении корпуса объектива из алюминиевого сплава с применением капролона в заднем отрезке термооптическая aberrация положения составляет соответственно $-0,006 \text{ мм}$ ($t = 35^\circ\text{C}$) и $+0,0038 \text{ мм}$ ($t = 5^\circ\text{C}$), а термооптические aberrации по

Таблица 3. Значения КПК объектива с $f' = 40 \text{ мм}$ на пространственной частоте 100 мм^{-1} при изменении температуры от 5 до 35°C в спектральном диапазоне 0,486–0,656 мкм

| $t, ^\circ\text{C}$ | | 20 | 5 | 35 |
|-----------------------|----|-----------|-----------|-----------|
| $\omega, \text{град}$ | 0 | 0,59 | 0,56 | 0,63 |
| | 15 | 0,54/0,55 | 0,53/0,56 | 0,53/0,56 |
| | 21 | 0,53/0,40 | 0,53/0,43 | 0,52/0,40 |
| | 30 | 0,43/0,50 | 0,42/0,51 | 0,42/0,49 |

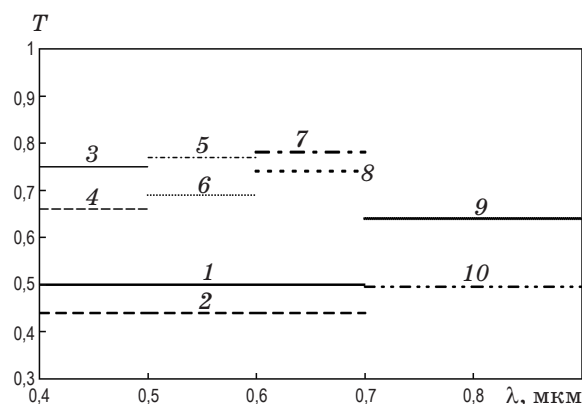


Рис. 2. Расчетный уровень полихроматического значения КПК в единой ПНИ среднефокусного объектива на пространственной частоте 100 мм^{-1} для основного канала ($\Delta\lambda = 0,41\text{--}0,7 \text{ мкм}$) — 1 (центр), 2 (поле) и на пространственной частоте 50 мм^{-1} для дополнительных каналов ($\Delta\lambda = 0,41\text{--}0,51 \text{ мкм}$ — 3 (центр), 4 (поле); $\Delta\lambda = 0,51\text{--}0,58 \text{ мкм}$ — 5 (центр), 6 (поле); $\Delta\lambda = 0,6\text{--}0,7 \text{ мкм}$ — 7 (центр), 8 (поле); $\Delta\lambda = 0,7\text{--}0,9 \text{ мкм}$ — 9 (центр), 10 (поле)).

полному зрачку и полю зрения в единой плоскости изображения не приводят к снижению расчетного значения КПК более чем на 0,05.

Для сохранения расчетного качества изображения в реальной системе на всех этапах технологического процесса осуществляется контроль основных характеристик оптических материалов и деталей и оптимизация системы на основе фактически измеренных величин. Основными этапами которого являются пересчет оптической схемы по данным измерений показателей преломления стекол конкретных варок, комплектация системы по результатам измерения параметров (радиусов и толщин) фактически изготовленных оптических деталей, окончательная юстировка системы в процессе сборки (в том числе, оптимизация термооптических параметров системы).

Для проверки параметров качества изображения объективов в широком интервале температур установка контроля функции передачи модуляции (ФПМ) [2] оснащена специально разработанной термокамерой, в которую помещается контролируемый объектив. Блок-схема установки показана на рис. 3.

Контролируемый объектив размещен между коллиматорным блоком и блоком приема и анализа изображения контрольной установки в термокамере, поддерживающей необходимую температуру объектива в процессе измерений. Тепловая изоляция термокамеры обеспечивает температурную стабильность измерительных элементов установки контроля независимо от температуры внутри камеры. Входное окно термокамеры расположено в параллельном пучке и не влияет на ход лучей в объективе. В качестве выходного окна, расположенного в сходящемся пучке лучей, использован имитатор защитного стекла приемника изображения, который является неотъемлемой частью оптико-электронной системы.

Процедура контроля состоит из следующих основных этапов: принудительный нагрев объектива в камере до максимальной рабочей температуры, контроль ФПМ объектива при мак-

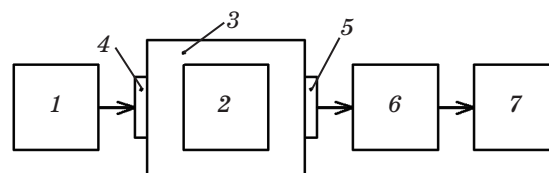


Рис. 3. Блок-схема установки контроля качества изображения объективов в широком диапазоне температур. 1 – коллиматорный блок, 2 – контролируемый объектив, 3 – термокамера, 4 – входное окно термокамеры, 5 – имитатор защитного стекла приемника изображения, служащий выходным окном термокамеры, 6 – блок приема и анализа изображения, 7 – компьютер.

симальной рабочей температуре объектива, определение положения плоскости наилучшей установки. Далее – естественное охлаждение объектива в камере до нормальной температуры (+20 °С), контроль ФПМ объектива при нормальной температуре, определение положения плоскости наилучшей установки. Затем следует принудительное охлаждение объектива в камере до минимальной рабочей температуры, контроль ФПМ объектива при минимальной рабочей температуре, определение положения плоскости наилучшей установки. После этого происходит естественный нагрев объектива в камере до нормальной температуры (+20 °С), контролируется ФПМ объектива при нормальной температуре и определяется положение плоскости наилучшей установки. В заключении сопоставляются и анализируются результаты измерений при различных температурах, вычисляются смещения плоскости наилучшей установки в диапазоне рабочих температур.

По результатам измерений проводилась тонкая коррекция температурной дефокусировки за счет подбора параметров компенсационного кольца, размещенного в заднем отрезке каждого из объективов.

Опытные образцы объективов обоих типов, изготовленные ОАО ЛЗОС, прошли предварительные испытания, подтвердившие их расчетные характеристики.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 671 с.
2. Шаров А.А., Галявов И.Р., Понин О.В., Кулеш В.П. Измерительная видеосистема для производственного испытания объективов по функции передачи модуляции / В сб. "Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений". В. 2. М.: ЦНИИ "Циклон", 2007. С. 76–82.