

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2013 Г.И. Цуканова, канд. техн. наук; А.В. Бахолдин, канд. техн. наук

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: zukanovaGI@aco.ifmo.ru, bakholdin@aco.ifmo.ru

В работе представлены два варианта оптических систем телескопов для одновременной работы в нескольких спектральных диапазонах. Оптическая система по первому варианту – это сложный шестиканальный телескоп, осуществляющий дневное и ночное наблюдение одновременно в трех спектральных диапазонах: видимом и двух инфракрасных. Оптическая система по второму варианту – это двухканальный телескоп дневного наблюдения, работающий одновременно в двух спектральных диапазонах: видимом и дальнем инфракрасном. Приводится оптическая система зеркального телескопа для видимого диапазона и характеристики качества изображения.

Ключевые слова: крупногабаритный телескоп, многоспектральный объектив, видимый и инфракрасный диапазоны.

Коды OCIS: 110.0110, 350.1260, 350.6090.

Поступила в редакцию 11.07.2013.

Оптические системы для контроля обстановки в околоземном космическом пространстве работают в широком спектральном диапазоне. Можно сделать несколько оптических систем для более узких спектральных диапазонов и получить хорошее качество изображения [1–3], а можно создать одну систему, работающую в нескольких диапазонах, но в этом случае в зависимости от задач и условий наблюдения необходимо менять приемники излучения [4] или применять спектроделители, что не всегда возможно.

В работе была поставлена задача изучить возможность создания крупногабаритного телескопа (с диаметром главного зеркала 2,5 м, угловым полем $2\omega = 1,2^\circ$, осевой длиной не более 4 м), осуществляющего дневное и ночное наблюдение одновременно в трех спектральных диапазонах: видимом и двух инфракрасных (ИК).

Основные характеристики для всех каналов телескопа приведены в таблице, принципиальная схема телескопа с четырьмя спектральными каналами – приведена на рис. 1, где компоненты 1, 2, 4 – зеркальные, 19–22 – спектроделители, остальные компоненты линзовые.

Главное зеркало диаметром 2,5 м является общим для всех каналов. Сложность задачи заключается в том, что в ИК каналах должен быть действительный выходной зрачок, расположенный на сравнительно небольшом расстоянии от плоскости изображения. Поэтому в ИК каналах необходимо иметь промежуточное изображение. Вблизи промежуточных изображений устанавливаются коллективные линзы (6, 10) для согласования зрачков.

Общая часть для каналов дневного и ночного наблюдения представляет собой зеркальную систему, близкую к телескопической системе Мерсенна. Видимое увеличение общей для всех каналов насадки 1 порядка 2^\times . Плоское зеркало 18 вводится в ход лучей при работе дневного канала и выводится при ночном наблюдении.

Компоновка канала ночного наблюдения приведена на рис. 2. (При описании рис. 2 позиции элементов соответствуют обозначениям на рис. 1) Объектив, работающий в видимом диапазоне, является трехзеркальным. 1 – первое и второе зеркала телескопа, 4 – третье зеркало. Спектроделитель (21), расположенный вблизи отверстия в главном зеркале, отражает излу-

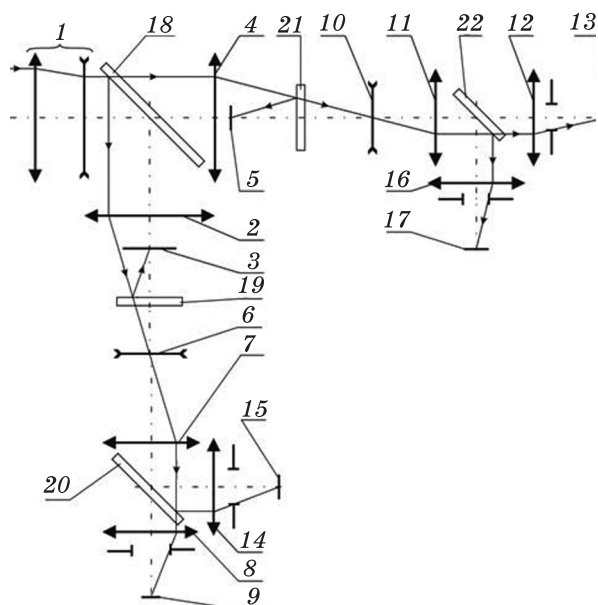


Рис. 1. Принципиальная схема компоновки оптической системы телескопа. Приемники для дневного наблюдения: 3 (0,45–0,8 мкм), 9 (7–11 мкм), 15 (1,5–3,0 мкм). Приемники для ночного наблюдения: 5 (0,5–0,9 мкм), 13 (7–11 мкм), 17 (1,5–3,0 мкм).

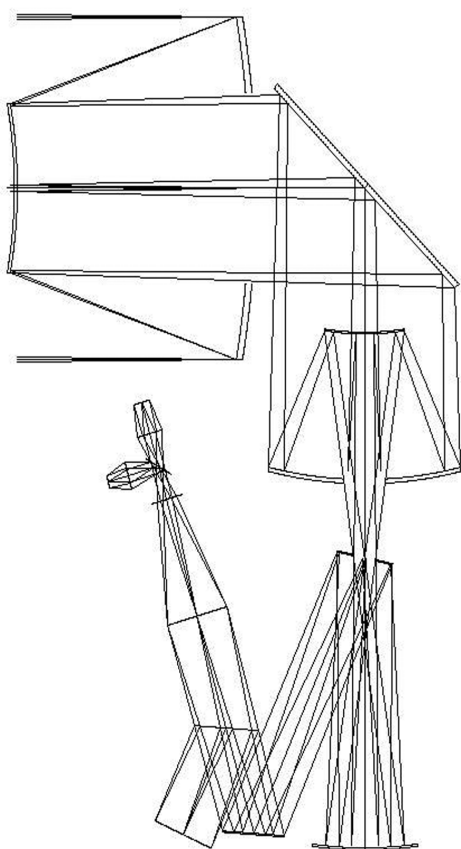


Рис. 3. Компоновка канала дневного видения

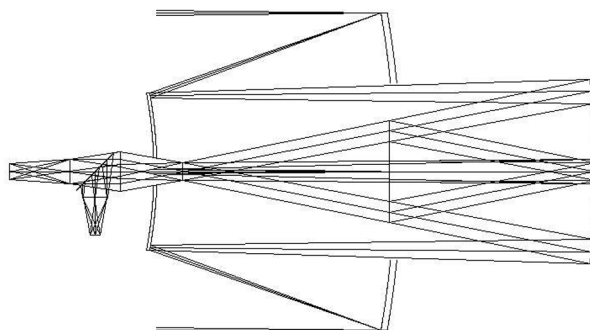


Рис. 2. Компоновка канала ночного видения

ние видимого диапазона на приемник (5), находящийся вблизи отверстия третьего зеркала (4), и пропускает ИК диапазон. Промежуточное ИК изображение находится вблизи отверстия во втором зеркале. В плоскости промежуточного изображения располагается коллектив, работающий в диапазоне 1,5–11 мкм и согласующий зрчки ИК каналов. ИК каналы выводятся через отверстие во втором зеркале и располагаются перед вторым зеркалом. В ИК каналах три линзовых объектива: первый – общий на весь ИК диапазон, после него в параллельном пучке лучей расположен спектроделитель, отражающий ближнюю ИК часть спектра и пропускающий дальнее ИК излучение. В каждом из ИК диапазонов свой объектив с соответствующим фокусным расстоянием.

В трехзеркальном объективе для видимого диапазона все три поверхности должны быть асферическими. Главное зеркало имеет асферическую поверхность высшего порядка, близкую к гиперболической, второе зеркало гиперболическое, а третье – эллиптическое. Экранирование по диаметру в телескопе из-за необходимости размещения между главным и третьим зеркалами наклонного зеркала, которое вводится в ход лучей при работе канала дневного наблюдения, составляет 0,48, а из-за необходимости защиты плоскости изображения от постороннего света, отраженного только от третьего зеркала, оно возрастает до 0,55. Телескоп имеет дифракционное качество изображения. Число Штреля для всего поля при $\lambda = 0,546$ мкм не менее 0,9.

Компоновка канала дневного наблюдения приведена на рис. 3. Объектив для видимого диапазона зеркальный и содержит пять “силовых” зеркал и два плоских зеркала. Первая часть телескопа представляет собой телескопическую насадку от трехзеркального объектива для ночного наблюдения в видимом диапазоне,

Основные характеристики каналов телескопа

Канал	Спектральный диапазон, мкм	Фокусное расстояние, мм	Относительное отверстие (при диаметре входного зрачка 2500 мм)	Линейное поле (при угловом поле 1,2°), мм	Позиции (по рис. 1)
Дневного видения	0,45–0,8	23500	1:9,4	492,2	1–2–3
Ночного видения	0,5–0,9	6500	1:2,6	136,14	1–4–5
Длинноволновый ИК	7–11	4500	1:1,8	94,25	1–2–6–7–8–9
					1–4–10–11–12–13
Коротковолновый ИК	1,5–3,0	6250	1:2,5	130,9	1–2–6–7–14–15
					1–4–10–11–16–17

а вторая часть телескопа (2) – систему с фокусным расстоянием порядка 10 м, угловым полем более 2° и относительным отверстием 1:9,4. Наиболее подходящей оптической системой при таких оптических параметрах является трехзеркальная система с промежуточным изображением после второго зеркала [5, 6]. Обычно в таких системах три асферические поверхности второго порядка, в данном случае удалось рассчитать систему с двумя асферическими зеркалами. Первое вогнутое зеркало эллиптическое, второе – выпуклое гиперболическое, а последнее вогнутое зеркало – сферическое. Промежуточное изображение находится в отверстии плоского зеркала, выходной зрачок всей системы расположен вблизи поверхности плоского зеркала.

Возможна и другая компоновка системы. Последнее плоское зеркало не пропускает пучок лучей от промежуточного изображения, как в предыдущем варианте, а отражает.

Качество изображения телескопа дифракционное, среднеквадратическая деформация волнового фронта для $\lambda = 0,546$ мкм составляет $0,03\lambda$, число Штреля для всего поля – более 0,9.

Спектроразделитель (19) отражает видимый диапазон и пропускает инфракрасный. В данном канале из-за большого размера изображения (порядка 0,5 м), соизмеримого с размерами зеркал, невозможно установить спектроразделитель перпендикулярно оптической оси, как это сделано в канале ночного наблюдения. Угол наклона спектроразделителя будет порядка 17°–18°, что приведет к появлению аберраций нецентрированной системы, но поскольку относительное отверстие системы невелико, это мало ухудшит качество изображения. После спектроразделителя в плоскости промежуточного изображения расположен коллектив (6), служащий для согласования зрачков. Первый ИК объектив (7)

является общим для двух ИК каналов, за ним в параллельном пучке лучей расположен спектроразделитель (20), отражающий ближнее ИК излучение и пропускающий дальний ИК диапазон. Объективы 8 и 14 для ближнего и дальнего ИК диапазонов имеют разные фокусные расстояния.

В целом исследование показывает, что задача создания крупногабаритного телескопа, осуществляющего ночное и дневное наблюдение одновременно в трех спектральных диапазонах, может быть решена и может быть достигнуто качество изображения, близкое к дифракционному как в видимом, так и в ИК каналах, но система получается сложная и ее габариты в поперечном направлении в полтора раза больше, чем в продольном.

Был рассмотрен вариант построения телескопа только для дневного наблюдения и только с двумя спектральными каналами – видимым и дальним инфракрасным. Фокусное расстояние

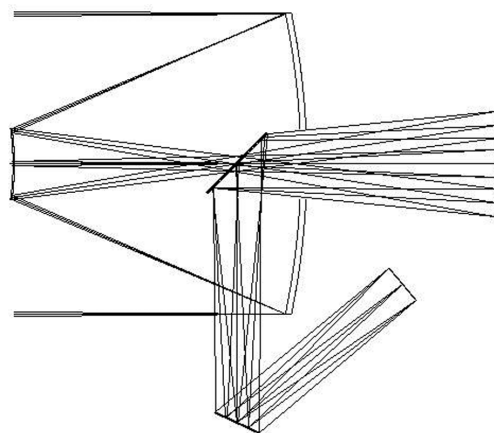


Рис. 4. Оптическая система видимого канала двухканального телескопа с характеристиками: фокусное расстояние 23,5 м, относительное отверстие 1:9,4, угловое поле $2\omega = 1,2^\circ$

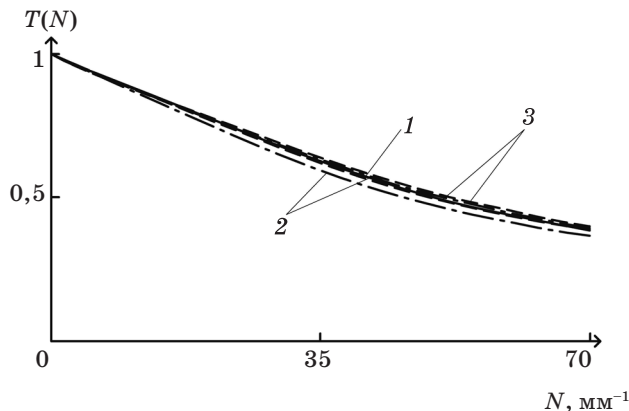


Рис. 5. ЧКХ оптической системы видимого канала двухканального телескопа для разных точек поля: 1 – $2\omega = 0^\circ$, 2 – $2\omega = 0,84^\circ$, 3 – $2\omega = 1,2^\circ$.

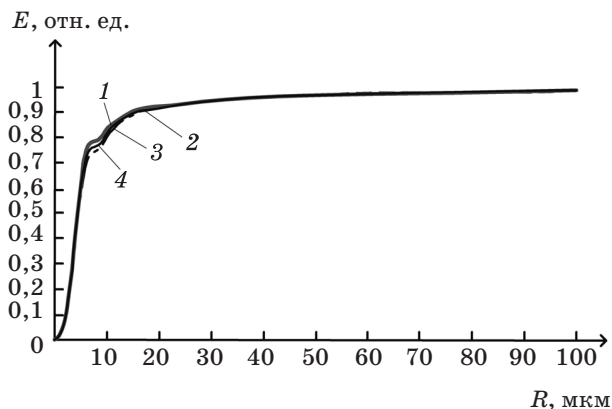


Рис. 6. Зависимость концентрации энергии (E) оптической системы видимого канала двухканального телескопа от радиуса кружка рассеяния (R) для разных точек поля: 1 – дифракционная кривая, 2 – $2\omega = 0^\circ$, 3 – $2\omega = 0,84^\circ$, 4 – $2\omega = 1,2^\circ$.

телескопа для видимого диапазона приблизительно в 5 раз больше фокусного расстояния для ИК диапазона.

Объектив для видимого диапазона длиннофокусный (23,5 м) и несветосильный, но со значительным угловым полем, поэтому его целесообразно строить по трехзеркальной схеме с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал [5, 6]. Компоновка системы осуществлялась исходя из заданных значений экранирования (не более 0,3 по диаметру), осевой длины и максимального значения дисторсии.

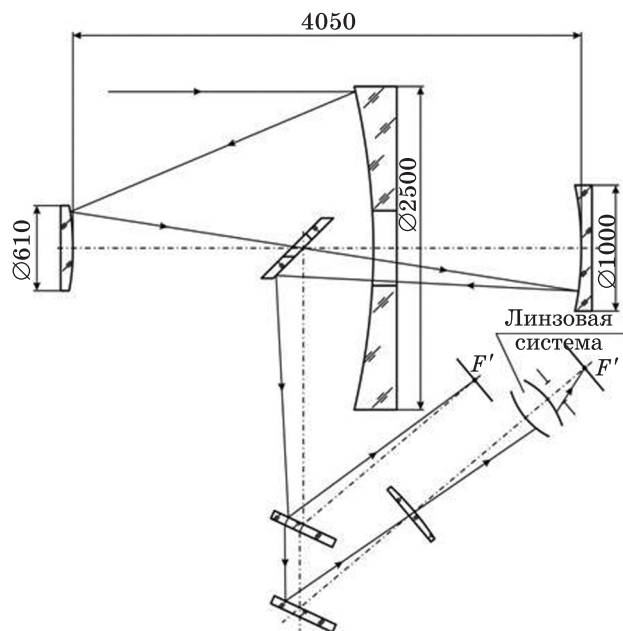


Рис. 7. Принципиальная оптическая схема двухканальной оптической системы телескопа.

Оптическая схема объектива показана на рис. 4. Объектив содержит три асферических зеркала второго порядка, из которых первое эллиптическое, близкое к параболическому, второе выпуклое гиперболическое, а третье вогнутое эллиптическое с небольшим коэффициентом деформации. Наклонное плоское зеркало расположено вблизи плоскости промежуточного изображения, созданного первым и вторым зеркалами, и имеет отверстие, диаметр которого приблизительно равен диаметру промежуточного изображения. Выходной зрачок объектива находится вблизи плоского зеркала.

На рис. 5, 6 приведены функция передачи модуляции и концентрация энергии с учетом дифракции и экранирования для объектива видимого диапазона.

Рассмотрим проектирование ИК канала. На рис. 7 представлена принципиальная схема компоновки двухканальной оптической системы телескопа.

Общими для двух каналов являются три асферических зеркала и одно плоское зеркало с отверстием, расположенное вблизи промежуточного изображения, создаваемого двумя зеркалами. Разделение пучков лучей осуществляется спектроделителем, представляющим собой плоскопараллельную пластинку, наклоненную на угол 25° к оптической оси. Видимое излучение отражается, а ИК – проходит. Наклон пластинки на угол 45° не желателен из-за несимметричных aberrаций, вносимых наклонной плоскопараллельной пластинкой в сходящемся пучке лучей. Чтобы не вносить в ИК систему несимметричных aberrаций, оптимально было бы

выполнить спектроделитель в виде кубика, однако размер кубика должен быть порядка 0,5 м, что нереально. Для сокращения габаритов в ИК канале используется еще одно плоское зеркало. Для согласования зрачков в оптической системе ИК канала в плоскости промежуточного изображения расположена линза из германия. Линзовый объектив с действительным выходным зрачком содержит четыре линзы с одной асферической поверхностью. Качество изображения во многом зависит от угла наклона и толщины спектроделителя, но даже при угле наклона 25° и толщине пластинки 40 мм качество

изображения в ИК канале может быть близким к дифракционному.

Задача минимизации массогабаритных характеристик космических оптических систем приводит к необходимости проведения исследований и поиску оптимальных схемных решений построения многоканального оптического тракта. В работе представлен подход к решению данной задачи. На сложном примере шестиканальной системы, с одновременной работой трех спектральных каналов, а также на примере двухканальной системы представлено решение с дифракционным качеством изображения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
2. *Теребиж В.Ю.* Современные оптические телескопы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 80 с.
3. *Чуриловский В.Н.* Теория хроматизма и аберраций третьего порядка, Л.:Машиностроение, 1968. 312 с.
4. *Лебедев О.А., Сабинин В.Е., Солк С.В.* Крупногабаритный многоспектральный объектив //Оптический журнал. 2011. Т. 78. №11. С. 24–27.
5. *Чубей М.С., Цуканова Г.И., Бахолдин А.В.* Специфика расчета оптической системы астрографа для проекта “Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория” //Оптический журнал. 2007. Т. 74. №7. С. 37–41.
6. *Чубей М.С., Цуканова Г.И., Бахолдин А.В.* Защита от прямых засветок в системе астрографа для Межпланетной солнечной стереоскопической обсерватории // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 70–73.