

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ИК ОБЪЕКТИВОВ

© 2013 г. А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук; Е. А. Шатова, канд. техн. наук; В. В. Медведев

ОАО “НПП “Геофизика–Космос”, Москва

E-mail: yanuch2003@inbox.ru

Рассмотрены оптические схемы особоширокоугольных трехлинзовых инфракрасных объективов для статических приборов ориентации космических аппаратов по Земле. Приводятся и анализируются оптические схемы широкоугольных трехлинзовых инфракрасных объективов для малогабаритного тепловизора.

Ключевые слова: широкоугольные объективы, оптические системы статических приборов ориентации по Земле.

Коды OGIS: 220.0220, 220.3620, 220.4830.

Поступила в редакцию 19.05.2012.

В работе [1] представлены оптические системы четырехлинзовых особоширокоугольных светосильных инфракрасных (ИК) объективов для статических углоизмерительных оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов (КА) по Земле (ПОЗ) на основе болометрической матрицы [2, 3] и рассмотрены особенности их проектирования. В указанных ПОЗ определяются угловые координаты отклонения оси визирования прибора относительно местной вертикали в спектральном ИК диапазоне 8–14 мкм.

Возможность создания простых четырехлинзовых схем ИК объективов с угловым полем $2\omega \approx 180^\circ$ и относительным отверстием $2a/f' = 1:2$ в значительной степени было обусловлено длинноволновым рабочим спектральным диапазоном (8–14 мкм), где влияние дифракции велико и допускает достаточно большие геометрические aberrации, не влияющие на качество изображения. Это обстоятельство в совокупности с использованием в качестве оптического материала монокристаллического германия, обладающего высоким коэффициентом дисперсии ($v_{8-14 \text{ мкм}} \approx 857,8$) и показателем преломления $n \approx 4$, обеспечило реализацию форсированных оптических характеристик четырехлинзовых объективов без принятия специальных мер по исправлению хроматизма. Объективы выполнены в виде двух отрицательных менисков и двух положительных линз.

Необходимость уменьшения габаритно-массовых характеристик (ГМХ) ПОЗ привела к поиску путей упрощения указанных схем объективов в части уменьшения числа линзовых компонентов и уменьшении длины при возможном выполнении требований, предъявляемым к объективам ПОЗ, для обеспечения необходимой точности.

В работе [1] показано, что в общем случае для обеспечения точности ПОЗ наряду с обеспечением таких оптических характеристик объективов, как f' , 2ω , $2a/f'$, λ , наиболее оптимальным является реализация следующих требований:

- минимальное изменение освещенности в плоскости изображения,
- закон построения изображения, близкий к линейной зависимости $y' = f'\omega$, обеспечивается одинаковой угловой чувствительностью по полю, где y' – размер изображения, f' – фокусное расстояние,
- минимальный размер пятна рассеяния для обеспечения максимальной точности определения энергетического центра изображения Земли на матрице фотоприемного устройства,
- телецентрический ход лучей, позволяющий минимизировать влияние дефокусировки матрицы, возникающей, например, при отсутствии термостабилизации объектива.

Следует отметить, что эти требования должны уточняться применительно к заданной точности прибора, условиям его работы и т. д.

Очевидно, что степень реализации указанных требований в схемах, например, трехлинзовых объективов со сферическими поверхностями, будет несколько ниже, чем в схемах четырехлинзовых объективов. Однако, для ряда случаев их использования в ПОЗ (о чем сказано далее) это не оказывает существенного влияния на точностные характеристики прибора.

В результате разработки, с учетом работ [1, 4, 5], были получены две схемы построения трехлинзового объектива (рис. 1а, б) с фокусным расстоянием $f' \approx 4,9$ мм, относительным отверстием $2a/f' = 1:2$ и угловым полем $2\omega = 176^\circ$ [6].

В первой схеме (рис. 1а) апертурная диафрагма расположена между вторым и третьим компонентами. Во второй схеме (рис. 1б) апертурная диафрагма расположена между первым и вторым компонентами.

Упрощение конструкций известных схем четырехлинзовых объективов обеспечивается за счет использования одного отрицательного мениска, предназначенного для развития углового поля, вместо двух.

Ухудшение качества изображения в полученных объективах по сравнению с четырехлинзовыми объективами происходит в основ-

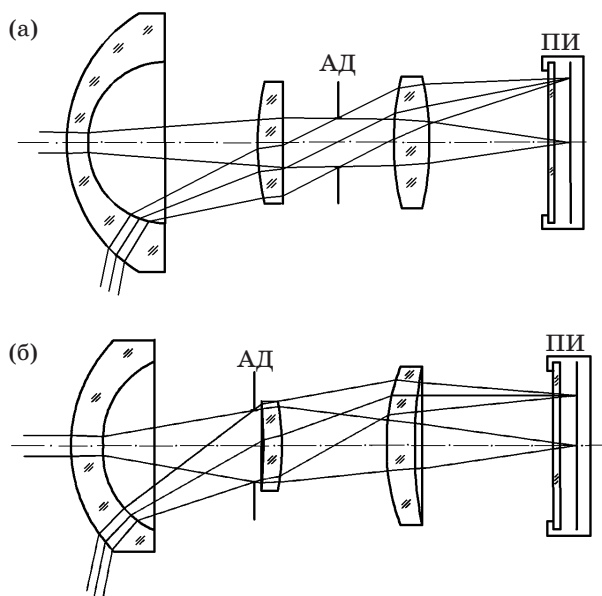


Рис. 1. Оптические схемы обошширокоугольных трехлинзовых ИК объективов для ПОЗ. АД – апертурная диафрагма; ПИ – приемник излучения: а – оптическая схема объектива с апертурной диафрагмой между вторым и третьим компонентами; б – оптическая схема объектива с апертурной диафрагмой между первым и вторым компонентами.

ном из-за полевых aberrаций, так как сферическая aberrация оптимизируется в большей степени положительными компонентами.

Сравнительный анализ приведенных схем трехлинзовых объективов показал, что при практически одинаковой оптимальной длине:

- падение освещенности и в первом и во втором варианте не более 5%,
- дисторсия (отклонение от линейной зависимости $y' = f'\omega$) в первой схеме меньше, чем во второй (0,1% в первой и 2% во второй),
- волновые aberrации порядка нескольких длин волн,
- отклонение от телецентрического хода лучей в первой схеме существенно больше, чем во второй (в первой схеме не более 15° на краю поля, во второй схеме – не более $1,5^\circ$).

К преимуществу первой схемы относится существенно меньшая величина дисторсии, что упрощает процедуру ее паспортизации. К преимуществу второй схемы относится близкий к телецентрическому ход лучей во всем угловом поле, что позволяет увеличить диапазон точных измерений ПОЗ. Следует отметить, что по сравнению с четырехлинзовыми объективами, приведенными в работе [1], длина трехлинзовых объективов сократилась \approx на 20%. Полученные схемы трехлинзовых объективов уступают системам четырехлинзовых объективов в части дисторсии (первая схема), качества изображения (первая и вторая схемы) и отклонения от телецентрического хода луча (первая схема). Однако:

- наличие дисторсии (отклонение от линейной зависимости $y' = f'\omega$ [4, 5]) порядка нескольких процентов, при проведении известной процедуры ее паспортизации и учета [7], не приводит к снижению точности ПОЗ,
- при работе ПОЗ на низких орбитах (порядка нескольких сотен километров) не требуется высокое качество изображения объективов из-за сильного размытия изображения края Земли, составляющего угловую величину порядка градуса и более [8], вызванного собственным излучением атмосферы,
- при малом диапазоне точных измерений ПОЗ, соответствующих отклонению визирной линии от вертикали порядка нескольких градусов и менее [3], в объективе не требуется полной реализации телецентрического хода лучей. Это обусловлено тем, что при отклонении от телецентрического хода лучей на краю поля даже на угол 15° , дефокусировка матрицы на 10–15 мкм в этом случае практически не вли-

жет на точность определения энергетического центра Земли в данных ПОЗ. Таким образом, полученные схемы трехлинзовых объективов при определенных условиях работы ПОЗ могут быть успешно использованы.

Качество изображения, создаваемого указанными объективами, может быть улучшено за счет применения асферических поверхностей в “силовых” компонентах. Это особенно важно для ПОЗ, предназначенного для использования в широком диапазоне орбит (180–40 000 км). Так, на рис. 2, приведена диаграмма пятна рассеяния в плоскости изображения для второй схемы объектива с асферической поверхностью второго порядка в третьем компоненте для различных координат углового поля (ω). Кружок Эри изображен в виде окружности. Полученная схема трехлинзового объектива с асферической поверхностью практически не уступает по своим характеристикам схемам известных четырехлинзовых объективов.

Оптические характеристики объектива для ПОЗ с асферической поверхностью (вторая схема):

- фокусное расстояние f' , мм 4, 9,
- относительное отверстие $2a/f'$ 1:2,
- угловое поле 2ω 176°,
- спектральный диапазон λ , мкм 8–14,
- дисторсия (отклонение от зависимости $y' = f'\omega$) –2%,
- размер геометрического пятна рассеяния по полю (рис. 2) меньше кружка Эри.

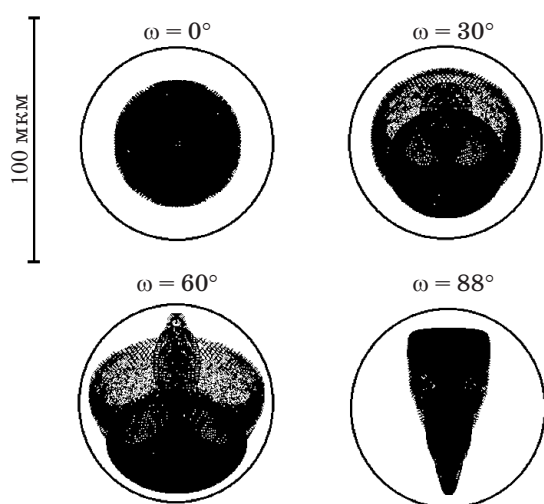


Рис. 2. Диаграмма пятен рассеяния ИК особо широкоугольного объектива для прибора ориентации по Земле.

Приведенные схемы особоширокоугольных ИК объективов были положены в основу при разработке объектива с угловым полем $2\omega = 90^\circ$ для малогабаритного тепловизора, работающего в спектральном диапазоне 8–14 мкм. Отличительной особенностью этой разработки явилось создание широкоугольного светосильного объектива ($2\omega = 90^\circ$, $2a/f = 1:2$), в котором необходимо было одновременно обеспечить высокое качество изображения (на уровне дифракционного), хорошее исправление дисторсии (отклонение от зависимости $y' = f'tg\omega$) при минимально возможном падении освещенности по полю и при минимальных ГМХ.

Отметим, что в общем случае для такого типа объективов освещенность по полю пропорциональна $\cos^4\omega$ и может составлять на краю заданного углового поля величину порядка всего 25%. Для улучшения указанной характеристики целесообразно использовать абберационное виньетирование и ход лучей близкий к телецентрическому [9, 10]. Дисторсию такого объектива можно допустить порядка $\approx -4\%$. При этой дисторсии искажения изображений еще заметно не сказываются, а также происходит некоторая компенсация искажений естественной перспективы в формируемом изображении [10].

В процессе разработки первоначально был получен вариант четырехлинзового объектива со сферическими поверхностями, выполненный в виде двух отрицательных менисков и двух положительных линз с апертурной диафрагмой, расположенной между ними. В данном варианте волновые aberrации не более $0,5\lambda$, дисторсия -4% , освещенность на краю 53%. Дальнейшая проработка показала возможность создания трехлинзового объектива с улучшенными габаритно-массовыми харак-

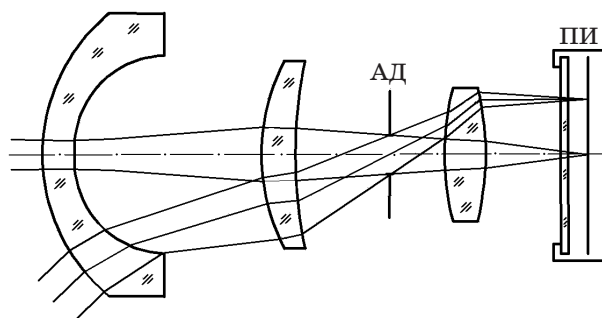


Рис. 3. Оптическая схема широкоугольного объектива для малогабаритного тепловизора. АД – апертурная диафрагма; ПИ – приемник излучения.

теристиками и улучшенными оптическими характеристиками.

Разработанный вариант трехлинзового объектива (рис. 3) построен на базе рассмотренного ранее особоширокоугольного объектива (рис. 1а). В объективе реализован телецентрический ход лучей и абберационное виньетирование. Первая поверхность отрицательного компонента в таком объективе выполнена асферической [6].

Оптические характеристики объектива:

– фокусное расстояние f' , мм	6,2,
– относительное отверстие $2a/f'$	1:2,
– угловое поле 2ω	90°,
– спектральный диапазон λ , мкм	8–14,
– падение освещенности от центра к краю	35% ,
– дисторсия (отклонение от зависимости $y = f'tg\omega$)	–4% ,

* * * * *

– волновые aberrации не более 0,25 λ .

Отметим, что в рамках данной разработки получен вариант трехлинзового объектива с освещенностью на краю поля 83% при дисторсии –10%. Такая величина дисторсии может быть учтена в алгоритме обработки изображения.

Выводы

Одним из путей уменьшения ГМХ статических ПОЗ является упрощение оптических систем существующих особоширокоугольных четырехлинзовых ИК объективов. Предложенные схемы трехлинзовых объективов для статических ПОЗ и малогабаритного тепловизора, в том числе и с использованием асферических поверхностей, позволяют реализовать высокие оптические характеристики при оптимальных ГМХ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гебгарт А.Я. Особенности проектирования некоторых типов особоширокоугольных объективов // Оптический журнал. 2010. Т 77. № 9. С. 17–21.
2. Пирогов М.Г., Видецких Ю.А., Федосеев В.И., Варламов В.И., Зензинов С.Ю., Колосов М.П., Стрижова Н.М., Гебгарт А.Я., Денисов В.В., Терехов М.А. Приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников для космических аппаратов (ПОЗ) // XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тезисы докладов. НПО “Орион”, М.: НПО “Орион”, 2008. С. 66–67.
3. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 247 с.
4. Тарабукин В.В. О расчете особоширокоугольных фотографических систем. // ОМП. 1971. № 11. С. 27–29.
5. Тарабукин В.В. Расчет особоширокоугольных фотографических систем // ОМП. 1974. № 3. С. 29–31.
6. Гебгарт А.Я., Шатова Е.А., Медведев В.В. Некоторые типы широкоугольных ИК объективов // Тезисы докладов научно-практической конференции “Оптика, фотоника и оптоинформатика в науке и технике” на VII Международном форуме “OPTICS-EXPO 2011”.
7. Карелин А.Ю. Повышение точности астроизмерительных широко-польных приборов с ПЗС матрицей // Оптический журнал. 1998. Т 11. № 8. С. 46–50.
8. Ивандиков Я.М. Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
9. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 383 с.
10. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 543 с.