

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.2

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ОСОБОШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

© 2010 г. А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук

ОАО НПП “Геофизика–Космос”, Москва

E-mail: yanuch2003@inbox.ru

Проводится анализ существующих особоширокоугольных объективов (угловое поле порядка 180°) для статических приборов ориентации космических аппаратов на Солнце и по Земле и формулируются требования к объективам для таких высокоточных приборов. Рассматриваются особенности проектирования этих объективов. Приводятся и анализируются схемы разработанных четырехлинзовых объективов.

Ключевые слова: особоширокоугольные объективы, оптические системы статических приборов ориентации на Солнце и по Земле.

Коды OCIS: 220.0220, 220.3620, 220.4830.

Поступила в редакцию 05.05.2010.

Введение

В настоящее время все большее применение находят статические высокоточные углоизмерительные оптико-электронные приборы ориентации космических аппаратов (КА) на Солнце (ПОС) и по Земле (ПОЗ) на основе многоэлементных приемников излучения [1–7]. Назначение этих приборов, как и приборов сканирующего типа, – определение угловых координат отклонения оси визирования прибора относительно направления на Солнце (для приборов ориентации на Солнце) или от местной вертикали (для приборов ориентации по Земле).

В отличие от сканирующих приборов статические приборы не содержат подвижных элементов и обладают более высокой информативностью. Это позволяет реализовать в них высокую точность, увеличить срок активного существования на КА и обеспечить лучшие габаритно-массовые характеристики.

Среди статических ПОС наиболее распространены приборы на матрицах и линейках ПЗС, работающие в спектральном диапазоне $\lambda \approx 0,4\text{--}1,1$ мкм [1–4]. Статические ПОЗ выполняются на основе специализированных многоэлементных приемников излучения и работают

в спектральном ИК диапазоне $\lambda \approx 8\text{--}14$ мкм или $\lambda \approx 14\text{--}16$ мкм, где наблюдаются наименьшие флуктуации излучения Земли [1, 5, 6].

Одним из путей обеспечения ориентации КА на Солнце и по Земле в угловых полях порядка 180° является использование нескольких указанных приборов с существенно меньшими угловыми полями, установленных под углом друг к другу [2, 5].

Другой путь – увеличение угловых полей статических ПОС и ПОЗ за счет использования в них особоширокоугольных объективов с угловыми полями $2\omega \approx 180^\circ$ [4, 6–8], что дает возможность реализовать оптимальные габаритно-массовые характеристики приборов при обеспечении высокой точности. Поэтому представляет интерес рассмотрение вопросов, связанных с проектированием таких объективов.

Особенности проектирования особоширокоугольных объективов для приборов ориентации на Солнце и по Земле

В патенте [4] приведен ПОС с угловым полем $2\omega \approx 180^\circ$, объектив которого выполнен в виде двух склеенных плосковыпуклых линз, между

которыми находится стеклянная диафрагма. Коэффициенты преломления n_1 , n_2 , n_3 всех трех по ходу луча оптических элементов выбираются из соотношения $n_1 < n_2 < n_3$. Перед фотоприемным устройством установлен светофильтр, уменьшающий влияние хроматизма на качество формируемого изображения. В данном объективе имеется неустранимая кривизна поля, в результате чего пятно рассеяния значительно меняется от центра к краю поля, что ухудшает энергетические и точностные характеристики датчика. Уменьшение изменения пятна рассеяния по полю за счет уменьшения входного зрачка приводит к влиянию дефектов стекла (пузыри, свищи и т. д.) на прохождение в нем пучка лучей от Солнца. Отсутствие телесцентрического хода лучей делает объектив чувствительным к дефокусировкам матрицы, вызванным термодеформациями, и требует термостабилизации объектива. Отклонение от концентричности поверхностей линз относительно апертурной диафрагмы, расположенной между ними, позволяет увеличить задний отрезок, необходимый для размещения фильтра, но существенно искажает форму кружка рассеяния для наклонных пучков.

В патенте [7] представлен широкоугольный датчик ПОЗ, объектив которого выполнен в виде входной и выходной плосковыпуклых линз с расположенной между ними диафрагмой, а чувствительная площадка матричного фотоприемника выполнена сферической и расположена на внешней поверхности выходной линзы. Низкое качество объектива из-за наличия сферической aberrации не позволяет создавать объективы с большим относительным отверстием. Возникновение воздушного зазора между линзами при больших полях приводит к полному внутреннему отражению, лучи соответствующих наклонов не попадают на приемник излучения и, как следствие, отсутствует информация об угловом положении Земли [4]. Изготовление матричного приемника сферической формы нетехнологично.

В рамках работы [8] разработан панорамный зеркально-линзовый объектив с угловым полем $2\omega = 176^\circ$ для спектрального диапазона $\lambda \approx 8-14$ мкм. Объектив имеет удовлетворительное качество изображения и телесцентрический ход лучей. Недостатками объектива являются большая длина и наличие слепого пятна в угловом поле, что не позволяет использовать его при работе на средних и высоких орбитах КА. Такого же типа объектив может быть исполь-

зован и для ПОС, однако наличие слепого пятна в угловом поле также существенно снижает возможности его применения.

Для этих же целей возможно применение особоширокоугольных многолинзовых объективов с угловыми полями $2\omega \approx 180^\circ$ с высоким качеством изображения [9–11]. Однако их конструкции достаточно сложны и для нашего случая не оптимальны.

На НПП “Геофизика–Космос” разработаны особоширокоугольные линзовые объективы с угловыми полями $2\omega \approx 180^\circ$ для статических ПОС и ПОЗ [6], обладающие достаточно простой конструкцией и высокими оптическими характеристиками. Рассмотрим более подробно некоторые особенности расчета указанных объективов и полученные результаты.

Практика проектирования приборов ориентации [1], а также анализ упомянутых выше схем объективов показывает, что наряду с обеспечением основных оптических характеристик (фокусное расстояние f' , угловое поле 2ω , относительное отверстие $2a/f'$, спектральный диапазон $\Delta\lambda$) для получения высокой точности необходима также и реализация следующих требований:

- минимальное изменение освещенности в плоскости изображения,
- закон построения изображения, близкий к линейной зависимости $y' = f'\omega$, где y' – размер изображения, f' – фокусное расстояние, ω – угол между соответствующим главным лучом и оптической осью в пространстве предметов (в этом случае обеспечивается одинаковая угловая чувствительность по всему полю);
- постоянство кружка рассеяния по полю в объективах для ПОС и минимальный размер пятна рассеяния для ПОЗ (в этом случае обеспечивается максимальная точность определения искомых координат на матрице фотоприемного устройства);
- телесцентрический ход лучей при отсутствии термостабилизации конструкции объектива.

Указанные требования носят общий характер и в каждом конкретном случае требуют уточнения применительно к заданной точности прибора, свойствам и возможностям фотоприемного устройства и т. д.

Как уже указывалось выше, известные особоширокоугольные объективы при обеспечении высокого качества изображения представляют собой сложные многолинзовые конструкции. В достаточной мере это обусловлено необходимостью устранения хроматических aberrаций.

Однако для рассматриваемых приборов необходимость устранения таких аберраций отсутствует, так как

- в объективе для ПОС, где интенсивность регистрируемого излучения избыточно высока, может быть использован, как и в работе [4], узкополосный светофильтр;
- в объективе для ПОЗ, работающего в диапазоне $\lambda \approx 8-14$ мкм, в качестве оптического материала для объектива прибора выбран моно-кристаллический германий (ГМО), обладающий очень высоким коэффициентом дисперсии ($v_{8-14 \text{ мкм}} \approx 857,8$).

Все это значительно упрощает оптические системы разрабатываемых объективов.

В общем случае, как это следует из работ [9, 12, 13], оптическую схему особоширокоугольного объектива можно представить в виде двух основных компонентов:

- 1-й компонент – отрицательные мениски для увеличения углового поля;
- 2-й компонент – положительный, предназначенный для формирования действительного изображения, создания необходимого относительного отверстия и отрицательной кривизны.

Первый компонент обеспечивает необходимый закон построения изображения. Известна реализация зависимостей $y' = f'\omega$, $y' = f'sin\omega$, $y' = 2f'sin(\omega/2)$ [9, 10, 13]. Зависимость типа $y' = f'tg\omega$ при углах $\omega \rightarrow 90^\circ$ не может быть реализована. В нашем случае, как это отмечено ранее, наиболее оптимальным вариантом является обеспечение линейной зависимости $y' = f'\omega$. Для его уверенной реализации, как правило, используют три отрицательных мениска. Однако при допущении некоторого отклонения от линейной зависимости $y' = f'\omega$, которое, как и в работе [13], будем понимать как дисторсию, возможно упрощение отрицательного компонента до двух менисков. В первую очередь это относится к объективу для ПОС, в котором используются стекла с относительно небольшим показателем преломления. При этом необходимо проведение известной процедуры паспортизации дисторсии и нахождение полинома, учитывающего это отклонение [14]. Предварительный анализ показал также, что применение в объективе ПОЗ германия, имеющего большой показатель преломления ($n \approx 4$), обеспечивает высокие коррекционные возможности объектива и линейный закон построения изображения (при высокой светосиле) уверенно реализуется с помощью двух отрицательных менисков.

При расчете указанных объективов следует обратить внимание на то, что сферическая аберрация для точки на оси оптимизируется в основном вторым компонентом, а полевые аберрации – первым и вторым компонентами совместно [11–13].

В результате расчета ряда оптических систем были получены две типовые схемы построения четырехлинзовых объективов для статических ПОС и ПОЗ. Данные схемы сочетают в себе требуемое качество изображения и оптимальные габариты. В первой типовой схеме объектив состоит из двух отрицательных менисков и двух положительных линз с апертурной диафрагмой, расположенной между положительными линзами. Во второй типовой схеме объектив состоит из двух отрицательных менисков и двух положительных линз с апертурной диафрагмой, расположенной между отрицательной и положительной линзами.

Коррекционные возможности первой типовой схемы в части исправления аберраций, особенно дисторсии в объективе для ПОС, несколько выше, чем для второй схемы. Однако во второй типовой схеме реализуются телесцентрический ход лучей и более высокая равномерность освещенности по полю. Кроме того, возможно упрощение положительного компонента до одной линзы за счет ее асферизации.

Окончательные схемы объективов с телесцентрическим ходом лучей, построенные по второй типовой схеме, приведены на рис. 1 (для ПОС) и на рис. 2 (для ПОЗ). На рис. 3 и 4 приведены диаграммы пятен рассеяния в плоскости изображения указанных объективов для различных координат углового поля ω . Кружок Эри на рис. 4 изображен в виде окружности.

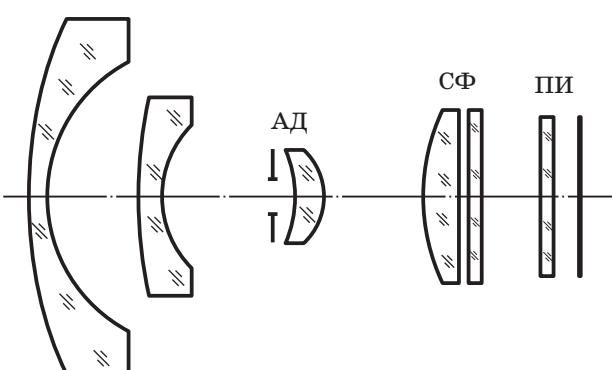


Рис. 1. Оптическая схема особоширокоугольного объектива для прибора ориентации на Солнце. АД – апертурная диафрагма, ПИ – приемник излучения, СФ – светофильтр.

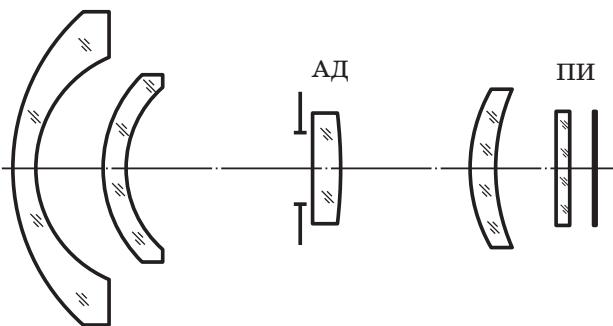


Рис. 2. Оптическая схема особоширокоугольного объектива для прибора ориентации по Земле. АД – апертурная диафрагма, ПИ – приемник излучения.

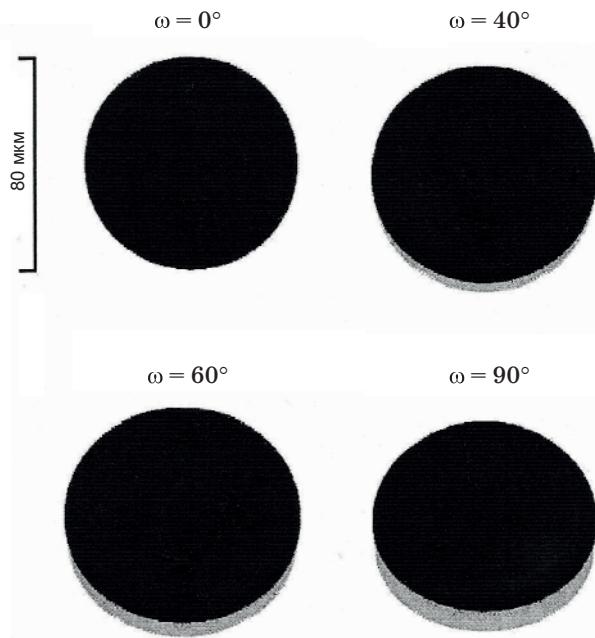


Рис. 3. Диаграмма пятен рассеяния особоширокоугольного объектива для прибора ориентации на Солнце.

Оптические характеристики объектива

для ПОЗ:

- | | |
|--|------|
| – фокусное расстояние f' , мм | 3,87 |
| – относительное отверстие $2a/f'$ | 1:2 |
| – угловое поле 2ω , угл. град | 176 |
| – спектральный диапазон λ , мкм | 8–14 |
| – изменение освещенности по полю, % | 5 |
| – дисторсия, % | 0,5 |
| – размер геометрического пятна рассеяния по полю (см. рис. 4) практически не превышает кружка Эри. | |

Выводы

Анализ оптических систем известных статических приборов ориентации на Солнце и по Земле с полем зрения порядка 180° показал, что оптические характеристики используемых в них двухлинзовых объективов, например их качество изображения, требуют улучшения. Использование зеркально-линзовых панорамных объективов ограничено наличием слепого пятна в угловом поле. Существующие многолинзовые конструкции объективов для рассматриваемых задач чрезвычайно сложны.

Предложенные схемы особоширокоугольных четырехлинзовых объективов при достаточной простоте конструкции позволяют реализовать

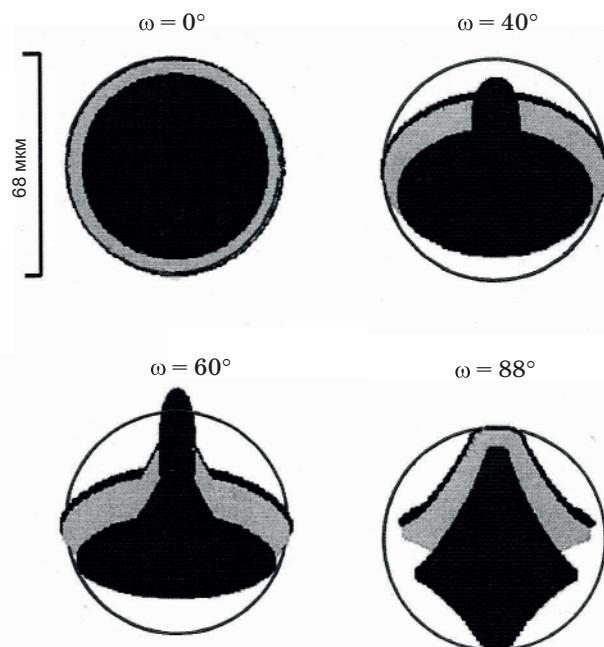


Рис. 4. Диаграмма пятен рассеяния особоширокоугольного объектива для прибора ориентации по Земле.

Оптические характеристики объектива

для ПОС:

- | | |
|---|--------------|
| – фокусное расстояние f' , мм | 5,66 |
| – относительное отверстие $2a/f'$ | 1:5 |
| – угловое поле 2ω , угл. град | 180 |
| – спектральный диапазон λ , мкм | 0,86–0,88 |
| – изменение освещенности по полю, % | 5 |
| – дисторсия, % | 10 |
| – изменение размера пятна рассеяния по полю (см. рис. 3), % | не более 10. |

высокие оптические характеристики и находят применение в высокоточных статических приборах ориентации на Солнце и по Земле.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федосеев В.И., Колосов М.П.* Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 247 с.
2. *Черемухин Г.С.* Приборы ориентации на Солнце для космических аппаратов. М.: Воентехнодиздат, 2004. 384 с.
3. *Аванесов Г.А., Никитин А.В., Форш А.А.* Оптический солнечный датчик // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 66–69.
4. *Видецких Ю.А., Егупов А.Н., Пирогов М.Г., Хайрулин Б.К.* Датчик углового положения Солнца // Патент России № 2308005. 2007.
5. *Глебович Л.А., Певунчиков И.В.* Перспективные схемы построения инфракрасных приборов ориентации по Земле // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 8. С. 76–79.
6. *Пирогов М.Г., Видецких Ю.А., Федосеев В.И., Варламов В.И., Зензинов С.Ю., Колосов М.П., Стрижкова Н.М., Гебгардт А.Я., Денисов В.В., Терехов М.А.* Приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников для космических аппаратов (ПОЗ) // Тез. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО “Орион”, 2008. С. 66–67.
7. *Каргу Л.И., Гриценко А.А.* Датчик горизонта // Патент России № 2020419. 1994.
8. *Урусова М.В.* Принципы построения панорамных оптических систем оптико-электронных приборов на базе оптических панорамных блоков // Автoreф. канд. дис. М.: МЭИ, 2007. 20 с.
9. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
10. *Беляков Г. Ф., Багдасаров А. А., Багдасарова О.В., Кузьмина Т.А.* Исследование и оценка светораспределения в плоскости изображения сверхширокоугольных объективов для минивидеокамер с ПЗС-матрицей // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 3. С. 23–30.
11. *Марчук С.М.* Широкоугольный проекционный объектив для системы отображения информации // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 27–29.
12. *Тарабукин В.В.* О расчете особоширокоугольных фотографических систем // ОМП. 1971. № 11. С. 20–23.
13. *Тарабукин В.В.* Расчет особоширокоугольных фотографических систем // ОМП. 1974. № 3. С. 29–31.
14. *Карелин А.Ю.* Повышение точности астроизмерительных широкопольных приборов с ПЗС-матрицей // Оптический журнал. 1998. Т. 11. № 8. С. 46–50.