

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 520.2

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНОГО 25-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА С СОСТАВНЫМ ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ

© 2007 г. В. В. Сычев, доктор техн. наук; В. Б. Касперский; М. Л. Машинина

НПО “Астрофизика”, Москва

E-mail: aphysica@acha.ru

Представлены результаты расчета четырехзеркальной двухступенчатой оптической системы крупногабаритного оптического телескопа с составным главным зеркалом (СГЗ), асферическая отражающая поверхность которого аппроксимирована шестиугольными сегментами сферической формы. Проведенный анализ качества изображения показал, что при выборе определенного размера элементов СГЗ предлагаемая аппроксимация в принципе позволяет достигнуть эквивалентного углового разрешения оптической системы телескопа лучше 0,1". Для 25-метрового телескопа могут использоваться элементы СГЗ размером около 1 м. Такое техническое решение целесообразно в плане практической реализации как в технологическом аспекте, так и с точки зрения применения адаптивного управления формой отражающей поверхности СГЗ.

Коды OCIS: 110.6770, 120.4820.

Поступила в редакцию 28.02.2006.

Введение

Над проблемами создания телескопов 5-го поколения (25-метрового и больших размеров) ученые и инженеры начали работать в начале 90-х годов прошлого века, когда разворачивалось проектирование и строительство четвертого поколения оптических телескопов 10-метрового класса [1–3]. В последние годы, когда реализация основных проектов телескопов четвертого поколения вступила в завершающую фазу, эти исследования начали расширяться и углубляться [4–8]. Невзирая на сложность стоящих проблем, вслед за предложениями по 25-метровым телескопам последовали аванпроекты инструментов с апертурой 50 м [9] и даже 100 м [10–13].

Анализ ошибок крупногабаритных телескопов показывает, что с ростом диаметра приемной апертуры удельный вклад конструкции и оптики в ухудшение качества изображения значительно возрастает [14]. Поэтому необходимо изменить подход к обоснованию выбора оптической схемы телескопа. Доминирующими становятся требования к возможности создания всей механической конструкции телескопа с приемлемыми массогабаритными, а также жесткостными и прочностными характеристиками, позволяющими обеспечить требуемое качество изображения и его стабильность. Именно правильный выбор оптической схемы, ее структу-

ры и коррекционных свойств и возможностей будет в значительной степени определять работоспособность будущего телескопа.

Кроме того, оптика телескопа должна быть максимально технологична, т. е. ее изготовление должно обеспечиваться на существующем или модернизированном оборудовании с минимальными допустимыми погрешностями и затратами при сохранении простоты, удобства и точности последующей сборки и юстировки.

Главным требованием к оптике телескопа 5-го поколения, наряду с безусловным требованием обеспечения высокого качества формируемого изображения, является максимальная компактность оптической системы. Это требование обусловлено необходимостью предельной минимизации габаритов, массы и, соответственно, стоимости всего телескопа.

С ростом диаметра апертуры телескопа при сохранении эквивалентного диафрагменного числа [15] пропорционально возрастают фокусное расстояние оптической системы телескопа и масштаб формируемого им изображения. При сохранении существующих ограничений на линейные размеры светоприемников, устанавливаемых в плоскости изображения, а также ограничений на диаметр линзовых корректоров, устанавливаемых вблизи плоскости изображения, с ростом диаметра телескопа будет уменьшаться его угловое поле.

Принципы построения оптической системы телескопа пятого поколения

Первые же расчеты оптических систем телескопа диаметром 25 и более метров показали, что классические двухзеркальные схемы не в состоянии обеспечить требуемые характеристики. Последующие исследования позволили сформулировать основные принципы проектирования оптической системы телескопов 5-го поколения:

- предельно светосильное главное зеркало (дифрагменное число порядка 1,0–1,5),
- ступенчатая структура оптической системы с минимальным количеством ступеней и оптических элементов в каждой ступени (в самом простом случае требуются две ступени по два оптических элемента в каждой) [16],
- минимальное взаимное влияние ступеней оптической системы,
- использование оптических элементов, особенно крупногабаритных, с минимальной асферичностью рабочей поверхности;
- относительно большой диапазон допустимых смещений оптических элементов друг относительно друга для обеспечения допустимой исходной жесткости конструкции механической части телескопа (оправ, трубы, опорно-поворотного устройства и т. п.), позволяющей минимизировать ее вес;
- свободные технологические допуски на качество изготовления оптики с сохранением качества изображения.

Наиболее заманчивым вариантом представляется двухступенчатая схема оптики – две ступени по два зеркала в каждой, причем первая ступень афокальная (или близкая к афокальной) [17]. Это позволит максимально развязать обе ступени как конструктивно, так и с точки зрения юстировки.

Сегодня, пожалуй, ни у кого не вызывает сомнения, что в качестве главных зеркал телескопов пятого поколения будут использоваться исключительно составные зеркала [18], у которых взаимное пространственное положение отдельных элементов во время работы будет непрерывно корректироваться с целью поддержания заданной формы и с целью адаптивной компенсации искажений волнового фронта формируемого телескопом изображения. Сами оптические элементы составного главного зеркала (СГЗ) должны быть максимально легкими и жесткими, так как они будут являться исполнительными элементами системы автоматического регулирования.

Вторым по значимости и трудности создания оптическим элементом современного зеркального телескопа является вторичное зеркало. Необходим

поиск компромисса, заключающегося в выборе такой оптической схемы, в которой предельно минимизированы диаметр вторичного зеркала, а также его кривизна и асферичность. Это необходимо для обеспечения технологичности его изготовления и контроля.

Интересным решением, несмотря на отступление от требования компактности оптической системы, является применение для первой ступени оптической системы зафокальных схем, позволяющих, во-первых, использовать более технологичные вогнутые вторичные зеркала уменьшенного размера, а также применять дополнительные линзовые корректоры в пространстве промежуточного изображения, а во-вторых, использовать само первичное изображение, адаптивно корректируя его качество с помощью элементов СГЗ.

Основными задачами оптики второй ступени являются согласование оптических параметров первой ступени с параметрами приемно-регистрирующей аппаратуры (угловое поле, масштаб изображения, кривизна поверхности изображения и т. д.), а также компенсация аберраций первой ступени. Оптика второй ступени может быть выполнена полностью или частично сменной в зависимости от назначения телескопа и состава его научных приборов. Основой для проектирования оптики второй ступени могут служить практически любые известные схемы зеркальных и зеркально-линзовых объективов.

Как было показано в работах [14, 19], наиболее рациональным и вероятным вариантом на сегодняшний день является создание адаптивного оптического телескопа 25-метрового класса. Именно для такого диаметра и была поставлена задача поиска схемы построения оптики телескопа, работающего в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн.

Оптическая система 25-метрового телескопа

Одним из наиболее перспективных вариантов оптической схемы для 25-метрового телескопа является, на наш взгляд, двухступенчатая четырехзеркальная схема с составным главным зеркалом [8, 14].

Первая ступень – двухзеркальная афокальная удлиняющая система Грегори. Она имеет следующие преимущества:

- незначительное экранирование главного зеркала,
- получение изображения в удобном для работы приемно-регистрирующей системы месте, непосредственно за главным зеркалом.

Для получения высокого качества изображения главное зеркало имеет форму асферики высшего порядка.

Вторая ступень представляет собой двухзеркальную фокусирующую предфокальную систему Кассегрена.

Параметры исходной оптической схемы телескопа (рис. 1)

Главное зеркало телескопа 1 – асферика высшего порядка диаметром 25 000 мм и радиусом ближайшей сферы $R = 75\,000$ мм.

Вторичное зеркало 2 – сфера диаметром 5000 мм и $R = 15\,000$ мм.

Расстояние между главным и вторичным зеркалами 45 000 мм.

Фокусное расстояние главного зеркала 37 500 мм.

Входной зрачок телескопа совпадает с вершиной поверхности главного зеркала.

Вторая фокусирующая ступень состоит из двух асферических зеркал высшего порядка. Диаметр третьего зеркала 3 составляет 5200 мм, $R = 17785$ мм; диаметр четвертого зеркала 4 составляет 2000 мм, $R = 6193$ мм. Вторая фокусирующая ступень расположена на расстоянии 5542 мм от главного зеркала исходя из конструктивных соображений и наилучшей коррекции aberrаций. Вершины третьего и главного зеркал совпадают. (Расстояние между вторым и третьим зеркалами – 45 000 мм.)

Эквивалентное фокусное расстояние 250 000 мм.

Диаметр входного зрачка 25 000 мм.

Расстояние плоскости изображения относительно главного зеркала – 1500 мм.

Угловое поле исходной оптической схемы было выбрано равным $3'$.

В результате расчета по программе “САРО” были получены следующие aberrации системы:

$$Y'_{\text{на оси}} = 0,006 \text{ мм},$$

$$Y'_{\text{вне оси}} = 0,0058 \text{ мм}.$$

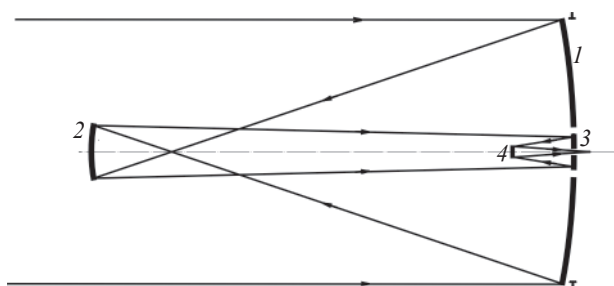


Рис. 1. Исходная оптическая схема 25-метрового телескопа. 1 – составное главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – третье зеркало, 4 – четвертое зеркало.

Оптическая схема 25-метрового телескопа после проведения коррекции по программе “ZEMAX-EE”

Оптимизация оптической системы 25-метрового телескопа с помощью пакета компьютерных программ “ZEMAX-EE” позволила на порядок улучшить результат по сравнению с исходным вариантом.

При этом удалось существенно уменьшить диаметры зеркал второй ступени телескопа: диаметр третьего зеркала сокращен с 5200 до 3000 мм, диаметр четвертого зеркала с 2000 до 1000 мм. Угловое поле системы увеличено с $3'$ до $10'$ (дифракционное качество системы).

В результате проведенной оптимизации aberrации системы уменьшились до значений

$$Y'_{\text{на оси}} = 0,0009 \text{ мм},$$

$$Y'_{\text{вне оси}} = 0,0023 \text{ мм}.$$

Коррекция исходной схемы 25-метрового телескопа привела также к изменению формы зеркал оптической системы. При этом все габаритные и оптические характеристики схемы удалось сохранить.

Приведем формулу поверхности с четной асферикой, по которой был проведен расчет телескопа по программе “ZEMAX”. Осесимметричная полиномиальная асферическая поверхность описывается путем добавления к формуле сферы полинома, характеризующего отклонения от сферической поверхности. В модели поверхности с четной асферикой для описания асферичности используются только четные степени радиальных координат. Стрелка прогиба поверхности определяется формулой

$$z = cr^2 / \left(1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2} \right) + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \dots + \alpha_8 r^{16},$$

где c – кривизна поверхности, r – радиальная координата в линейных единицах схемы, $k = -\varepsilon^2$ – коническая постоянная (ε – эксцентриситет поверхности), α_i – коэффициенты асферики.

После проведения коррекции оптической системы для поля $10'$ главное зеркало 25-метрового телескопа представляет собой гиперолоид шестого порядка с коэффициентами асферики

$$\alpha_1 = -4,661 \times 10^{-8},$$

$$\alpha_2 = -7,152 \times 10^{-17},$$

$$\alpha_3 = 2,717 \times 10^{-27}$$

и конической постоянной $k = -1,275163$.

Вторичное зеркало телескопа представляет собой эллипсоид шестого порядка диаметром 5 м с коэффициентами асферики

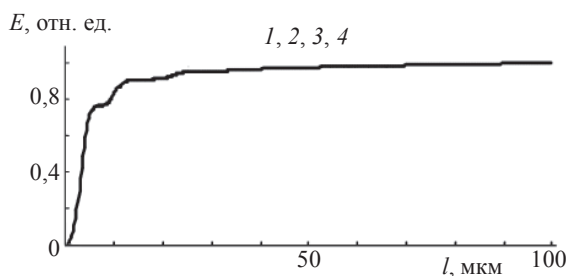


Рис. 2. Зависимости концентрации энергии E в кружке рассеяния l в фокальной плоскости системы. Пояснения в тексте.

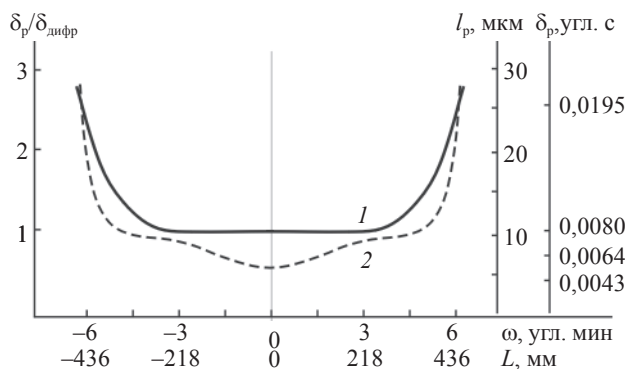


Рис. 3. Зависимости aberrаций от углового и линейного полей. 1 – зависимость отношения кружка рассеяния точки в реальной δ_p и дифракционно-ограниченной $\delta_{\text{дифр}}$ оптических системах от углового ω и линейного L полей; 2 – зависимость размера изображения (по уровню $0,8E_0$) в линейной l_p и угловой мере δ_p от углового ω и линейного L полей.

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1,997 \times 10^{-6}, \\ \alpha_2 &= -1,288 \times 10^{-14}, \\ \alpha_3 &= -3,581 \times 10^{-23}\end{aligned}$$

и конической постоянной $k = -0,155784$.

Третье зеркало телескопа – сплюснутый сфероид четвертого порядка диаметром 3 м с коэффициентами асферики

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 3,974 \times 10^{-6}, \\ \alpha_2 &= -1,836 \times 10^{-14}\end{aligned}$$

и конической постоянной $k = 0,8721267$.

Четвертое зеркало телескопа – сплюснутый сфероид четвертого порядка диаметром 1 м с коэффициентами асферики

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -5,371 \times 10^{-7}, \\ \alpha_2 &= 6,165 \times 10^{-13}\end{aligned}$$

и конической постоянной $k = 3,743774$.

На рис. 2 приведены зависимости концентрации энергии E в кружке рассеяния l в фокальной плоско-

сти системы. Видно, что дифракционные (кривая 1) и расчетные значения энергий для углов поля 0° , $5'$ и $-5'$ (кривые 2, 3 и 4 соответственно) оптимизированной оптической системы практически совпадают. Это означает, что оптимизированная оптическая система обладает дифракционным качеством.

На рис. 3 приведены зависимости aberrации от углового и линейного полей.

Заключение

Предложенная оптическая схема 25-метрового телескопа обладает рядом достоинств, обеспечивающих высокое качество изображения в сочетании с технологичностью. Это оказалось возможным за счет того, что

- главное зеркало с диафрагменным числом 1,5 составлено из метровых элементов сферической формы,
- асферичность отражающей поверхности СГЗ обеспечивается путем соответствующей установки образующих ее сферических элементов (среднеквадратическое отступление аппроксимированной поверхности от расчетной асферической в пределах 25-метровой апертуры не превышает $0,012 \text{ мкм}$ ($\lambda_{\text{вид}}/40$);
- вторичное зеркало диаметром 5 м асферической формы может быть как выпуклым (предфокальная первая ступень), так и вогнутым (зафокальная первая ступень);
- афокальная (или близкая к ней) двухзеркальная первая ступень формирует практически равноискаженные изображения в пределах всего углового поля, при этом за счет управления элементами СГЗ в составе адаптивной системы имеется возможность поддерживать требуемое качество оптической системы;
- первая и вторая ступени оптической системы почти независимы за счет квазиафокальности первой ступени,
- имеется дополнительная возможность использования первичного фокуса с широким угловым полем в совокупности с корректором (или без него) и адаптивной коррекцией качества изображения с помощью управляемых элементов СГЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Scientific American. November 1991. V. 256. № 5.
2. Рэндалл Л.К. Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов / Под ред. Хьюит А. М.: Мир, 1983. С. 288.
3. Мейнел А.Б. Оптические телескопы будущего. М.: Мир, 1981. С. 20–35.
4. Ardeberg A., Andersen T., Owner-Petersen M. Study of a 25 m Telescope for Optical Wavelengths // Proc. SPIE. 1994. V. 2199. P. 315–333.

5. Sychev V.V., Kasperski V.B., Stroganova S.M., Travush V.I. On conceptual design options of a large optical telescope of 10...25 metre class // Proc. SPIE. 1996. V. 2861. P. 624–634.
6. Bash F.N., Sebring T.A., Ray F.B., Ramsey L.W. The Extremely Large Telescope: A twenty-five meter aperture for the twenty-first century // Proc. SPIE. 1996. V. 2861. P. 576–584.
7. Зверев В.А., Бахолдин А.В., Гаврилюк А.В. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 6. С. 6–14.
8. Бахолдин А.В., Зверев В.А., Романова Г.Э. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 2. С. 24–28.
9. Ardeberg A., Andersen T., Owner-Petersen M., Jessen N.-C. A 25 m Live Optics Telescope // Proc. SPIE. 1996. V. 2861. P. 585–596.
10. Nelson J.E. Design Concept for the California Extremely Large Telescope (CELT) // Proc. SPIE. 2000. V. 4004. P. 282–299.
11. Dierickx P., Gilmozzi R. Progress of the OWL 100-m Telescope Conceptual Design // Proc. SPIE. 2000. V. 4004. P. 290–299.
12. Atad-Ettinger E., Worswick S., Wells M., Ramsay S., Hastings P., Wright G. An Integral Approach to the design of a 100 m telescope, its adaptive optics and instrumentation // Proc. SPIE. 2000. V. 4004. P. 300–310.
13. Ray F.B., Bash F.N., Ramsey L.W., Sebring T.A. Issues in scaling ELT up to 100 meters // Proc. SPIE. 2000. V. 4004. P. 405–419.
14. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. The problems of the 25-m class supertelescope designing // Proc. SPIE. 2000. V. 4004. P. 330–339.
15. ГОСТ 7427-76. Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения.
16. Meinel A.B., Meinel M.P. Two-stage optics: high-acuity performance from low-acuity optical systems // Opt. Engin. 1992. V. 31. № 11. P. 2271–2281.
17. Puryayev D.T. Afocal two-mirror system // Opt. Engin. 1993. V. 32. № 1. P. 1325–1327.
18. Owner-Petersen M. Optical design and performance analysis of a 25 m class telescope with a segmented spherical primary // Proc. SPIE. 1996. V. 2871. P. 607–612.
19. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол.: Тонкие наукоемкие технологии, 2005. С. 464.