
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 520.2.03; 520.2.062

А. В. ДЕМИН, Л. М. МЕНДЕЛЕЕВА

АЛГОРИТМ ЮСТИРОВКИ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Рассмотрены особенности юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов. Предложены математическая модель и алгоритм процесса юстировки зеркал методом компарирования.

Ключевые слова: высокоапертурный телескоп, главное зеркало, апертура, волновой фронт, нормаль, вектор, позиционирование, компаратор, алгоритм, модель.

На современном этапе развития космических технологий одним из перспективных направлений является создание многозональных высокоапертурных зеркально-линзовых телескопов, обеспечивающих сбор и обработку информации в диапазоне спектра излучения от ультрафиолетового до инфракрасного, что позволяет расширить границы астрофизических исследований и повысить информационные возможности космических систем дистанционного зондирования поверхности Земли.

Одна из проблем создания высокоапертурных телескопов — уменьшение значения показателя m_S (масса на единицу площади) — может быть решена при конструкторско-технологической реализации главного зеркала как основного массогабаритного компонента телескопа. В настоящее время технологии изготовления облегченных зеркал достаточно развиты, однако на практике создание зеркал диаметром более 2,5 м с приемлемым значением m_S проблематично. В этой связи наиболее перспективным путем решения данной проблемы является создание составных зеркал, состоящих из зеркальных сегментов, что, в частности, отражено в работах [1—4].

Основные проблемы при создании составных зеркал (СЗ) связаны с разработкой методов и средств их сборки и обеспечением требуемого качества изображения в процессе эксплуатации зеркала в составе телескопа.

Позиционирование зеркальных сегментов (ЗС) на базовой поверхности составного зеркала в соответствии с оптическим расчетом осуществляется в два этапа — геометрическое и опtotехническое позиционирование, реализуемое с помощью управляемых активаторов (пьезопривода). Геометрическое позиционирование зеркальных сегментов осуществляется путем их перемещения по трем линейным направлениям (вдоль оптической оси и в плоскости, перпендикулярной ей): тем самым обеспечивается решение задачи минимизации амплитудных искажений. Опtotехническое позиционирование ЗС осуществляется в трех угловых направлениях относительно вершины сегмента (два наклона относительно оптической оси и поворот вокруг нее): тем самым обеспечивается решение задачи минимизации фазовых искажений.

Таким образом, решение задачи минимизации амплитудно-фазовых искажений волнового фронта, создаваемых составным зеркалом $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ по отношению к оптическому расчету для эталона $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$, обеспечивается при выполнении следующих условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \mathbf{R}_i^X \cdot \mathbf{R}_i^Y - L_{RiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^X \times \mathbf{R}_i^Y = \mathbf{R}_i^Z \right\}_{i=1}^N ; \\ \left\{ \mathbf{P}_i^X \cdot \mathbf{P}_i^Y - L_{PiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{P}_i^X \times \mathbf{P}_i^Y = \mathbf{P}_i^Z \right\}_{i=1}^N ; \\ \left\{ \left\{ \mathbf{R}_i^X \times \mathbf{P}_i^X = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^Y \times \mathbf{P}_i^Y = 0 \right\}_{i=1}^N ; \left\{ \mathbf{R}_i^Z \times \mathbf{P}_i^Z = 0 \right\}_{i=1}^N ; \right. \\ \left. \left\{ \left| \mathbf{R}_i^X \right| = \left| \mathbf{P}_i^X \right| \right\} ; \left\{ \left| \mathbf{R}_i^Y \right| = \left| \mathbf{P}_i^Y \right| \right\} ; \left\{ \left| \mathbf{R}_i^Z \right| = \left| \mathbf{P}_i^Z \right| \right\} ; \right. \\ \left. \left\{ W_{Ri} = -n' \int_{\sin u'_{R0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{R0i} d(\sin u'_{R0i}) \right\}_{i=1}^N - \left\{ W_{Pi} = -n' \int_{\sin u'_{P0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{P0i} d(\sin u'_{P0i}) \right\}_{i=1}^N \right\} = \min, \quad (1a)$$

где символы R_i и P_i означают принадлежность к расчетному i_R -му и позиционируемому i_P -му зеркальным сегментам; N — число зеркальных сегментов; \mathbf{R}_i^X , \mathbf{R}_i^Y , \mathbf{R}_i^Z и \mathbf{P}_i^X , \mathbf{P}_i^Y , \mathbf{P}_i^Z — тройки векторов, определяющие положение зеркальных сегментов; L_{RiXY} и L_{PiXY} — отстояние вершин i_R -го и i_P -го ЗС от точек отсчета на базовой поверхности СЗ; $\{W_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{W_{Pi}\}_{i=1}^N$ — волновой фронт (в данном случае используется понятие волновой aberrации i_R -го и i_P -го ЗС и соответствующая формула, приведенная в работе [5]); $\{u'_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{u'_{Pi}\}_{i=1}^N$ — апертурные углы i_R -го и i_P -го ЗС, $\{g_{Ri}\}_{i=1}^N$ и $\{g_{Pi}\}_{i=1}^N$ — поперечные aberrации этих сегментов, здесь индекс „0“ обозначает принадлежность к сфере сравнения; штрихами обозначено отношение символа к задней апертуре (пространству изображения); n' — показатель преломления составного зеркала.

Система уравнений (1) определяет условия ортогональности троек векторов (1a) и минимизации разности волновых aberrаций (1б) i_R -го и i_P -го ЗС при изготовлении сегментов в пределах допусков: $\{\delta(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$.

Введем систему координат XYZ , начало которой совпадает с вершиной $\{F_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$ составного зеркала, при этом ось OZ совпадает с его оптической осью. Положение каждого ЗС можно определить касательной плоскостью и нормалью к его вершине относительно системы координат $\{X_i, Y_i, Z_i\}_{i=1}^N$ в соответствии с уравнениями [6]

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right)_{0i} (x_i - x_{0i}) + \left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i} \right)_{0i} (y_i - y_{0i}) + \left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i} \right)_{0i} (z_i - z_{0i}) = 0; \quad (2a)$$

$$\frac{x_i - x_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right)_{0i}} = \frac{y_i - y_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i} \right)_{0i}} = \frac{z_i - z_{0i}}{\left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i} \right)_{0i}}, \quad (2б)$$

где $\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_i}\right)_{0i}$, $\left(\frac{\partial F_i}{\partial y_i}\right)_{0i}$, $\left(\frac{\partial F_i}{\partial z_i}\right)_{0i}$ — частные производные функции $F(x,y,z)$ в точке $M_{0i} = (x_{0i}; y_{0i}; z_{0i})$; $(x_i; y_i; z_i)$ и $(x_{0i}; y_{0i}; z_{0i})$ — координаты поверхности i -го сегмента.

Применение современных информационных и компьютерных технологий в оптике, несомненно, обеспечивает более высокую производительность по сравнению с аппаратными средствами, используемыми при сборке. В этой связи представим процесс позиционирования каждого зеркального сегмента на базовой поверхности (БП) как реализацию метода компарирования. Рассмотрим функцию реального компаратора, которую выполняет компьютер с двумя экранами — виртуальный компаратор. На первом экране отображена виртуальная модель составного зеркала, выполняющая роль меры сравнения (эталона): $\left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N$ — поверхности, „разбитой“ на N зеркальных сегментов $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$, параметры которых, включая и координаты вершин, определены в соответствии с оптическим расчетом. На втором экране виртуального компаратора — объект-модель $\left\{P_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2) = 0\right\}_{i=1}^N$ — отображение текущего положения позиционируемых сегментов $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ на БП, само перемещение их осуществляется активаторами. Здесь ρ_{0Ri} и ρ_{0Pi} — радиусы кривизны при вершинах i_R -го и i_P -го ЗС; e_{Ri}^2 и e_{Pi}^2 — квадраты эксцентриситета их образующих поверхностей.

Условием правильной сборки составного зеркала, помимо выполнения соотношений (1), является обеспечение соответствия качества изображения расчету, что достигается максимально возможным совпадением объекта-модели и расчетной (эталонной) модели, а именно $\{i_{Pi}\}_{i=1}^N$ и $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$:

$$\left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N \cup \left\{P_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2) = 0\right\}_{i=1}^N = \max. \quad (3)$$

Алгоритм позиционирования зеркальных сегментов на базовой поверхности составного зеркала можно определить как последовательность действий, производимых с i_P -м ЗС относительно i_R -го.

Шаг 1. Формирование виртуального компаратора и базы исходных данных:

$$\begin{aligned} & \left\{R_i(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2) = 0\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{\mathbf{R}_i^X \cdot \mathbf{R}_i^Y - L_{RiXY} = 0\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{\mathbf{R}_i^X \times \mathbf{R}_i^Y = \mathbf{R}_i^Z\right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}, \rho_{0Ri}, e_{Ri}^2\right\}; \\ & \left\{W_{Ri} = -n' \int_{\sin u'_{R0i}}^{\sin u'_{0i}} \delta g'_{R0i} d(\sin u_{R0i}^i)\right\}_{i=1}^N, \end{aligned}$$

а именно:

— эталона — изображения базовой поверхности составного зеркала, состоящей из N зеркальных сегментов $\{i_{Ri}\}_{i=1}^N$ в соответствии с оптическим расчетом на телескоп;

— базы данных, формируемой относительно пространственного положения зеркальных сегментов эталона на базовой поверхности, — N троек векторов, определяющих касательные плоскости и нормали зеркальных сегментов эталона в соответствии с оптическим расчетом на телескоп.

Шаг 2. Формирование объекта-модели — начальное положение:

$$\begin{aligned} & \left\{ P_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2) = 0 \right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{ \mathbf{P}_i^X \cdot \mathbf{P}_i^Y - L_{PiXY} = 0 \right\}_{i=1}^N; \\ & \left\{ \mathbf{P}_i^X \times \mathbf{P}_i^Y = \mathbf{P}_i^Z \right\}_{i=1}^N, \\ & \left\{ x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}, \rho_{0Pi}, e_{Pi}^2 \right\}. \end{aligned}$$

Шаг 3. Выбор опции „геометрическое позиционирование“ и назначение траектории „обхода“ сегментов.

Шаг 4. Выбор первого геометрически позиционируемого зеркального сегмента объекта-модели и его аналога на эталоне, определение их троек векторов: представление касательной плоскости и нормали тройкой векторов, положения которых определены параметрами измерительных датчиков позиционируемого сегмента для 1_P -го ЗС, и ввод расчетных данных 1_R -го ЗС эталона:

$$\begin{aligned} & \left\{ x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}, \rho_{0P1}, e_{P1}^2 \right\}, \\ & \left\{ \mathbf{P}_1^X; \mathbf{P}_1^Y; \mathbf{P}_1^Z; L_{P1XY} \right\}; \\ & \left\{ x_{R1}, y_{R1}, z_{R1}, \rho_{0R1}, e_{R1}^2 \right\}, \\ & \left\{ \mathbf{R}_1^X; \mathbf{R}_1^Y; \mathbf{R}_1^Z; L_{R1XY} \right\}. \end{aligned}$$

Шаг 5. Покоординатное сравнение тройки векторов для 1_P -го ЗС объекта-модели с тройкой векторов для соответствующего 1_R -го ЗС эталона (в соответствии с шагами 1 и 3):

$$\left. \begin{aligned} & P_1(x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}, \rho_{0P1}, e_{P1}^2) = 0; \\ & \mathbf{P}_1^X \cdot \mathbf{P}_1^Y - L_{P1XY} = 0; \\ & \mathbf{P}_1^X \times \mathbf{P}_1^Y = \mathbf{P}_1^Z; \end{aligned} \right\} \vee \left. \begin{aligned} & R_1(x_{R1}, y_{R1}, z_{R1}, \rho_{0R1}, e_{R1}^2) = 0; \\ & \mathbf{R}_1^X \cdot \mathbf{R}_1^Y - L_{R1XY} = 0; \\ & \mathbf{R}_1^X \times \mathbf{R}_1^Y = \mathbf{R}_1^Z. \end{aligned} \right\}$$

Шаг 6. При соблюдении условий, регламентируемых шагами 1 и 3, „закрепление“ 1_P -го ЗС на БП и переход ко второму позиционируемому зеркальному сегменту объекта-модели. Если шаги 1 и 3 не выполнены, то переход к шагу 3 и повтор действий относительно 1_P -го ЗС.

Шаг 7. Выполнение действий, аналогичных шагам 3, 4 и 5 относительно $(N - 1)$ троек векторов для геометрически позиционируемых ЗС на базовой поверхности составного зеркала.

Шаг 8. Завершение этапа геометрического позиционирования N зеркальных сегментов на базовой поверхности в соответствии с оптическим расчетом на телескоп и переход к этапу оптотехнического позиционирования.

Шаг 9. Выбор первого оптически позиционируемого зеркального сегмента объекта-модели и введение в компьютер параметров волнового фронта (или волновой аберрации) в соответствии с показаниями датчика волнового фронта:

$$W_{P1} = -n' \int_{\sin u'_{P01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{P01} d(\sin u'_{P01}).$$

Шаг 10. Сравнение значений W_{P1} и W_{R1} , т.е. выполнение операции

$$\left\{ W_{R1} = -n' \int_{\sin u'_{R01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{R01} d(\sin u'_{R01}) \right\} - \left\{ W_{P1} = -n' \int_{\sin u'_{P01}}^{\sin u'_{01}} \delta g'_{P01} d(\sin u'_{P01}) \right\} = \Delta W_1,$$

$$\Delta W_1 \vee \delta W_1.$$

Шаг 11. Если $\Delta W_1 \leq \delta W_1$, то переход ко второму сегменту. Если $\Delta W_1 > \delta W_1$, то посредством последовательных угловых подвижек 1-го сегмента обеспечение выполнения требований по качеству изображения.

Шаг 12. Повторение шагов 8, 9 и 10 относительно $(N - 1)$ позиционируемых сегментов.

Шаг 13. Оценка качества изображения, формируемого составным зеркалом:

$$\left\{ W_R = -n' \int_{\sin u'_{R0}}^{\sin u'_{0}} \delta g'_{R0} d(\sin u'_{R0}) \right\} - \left\{ W_P = -n' \int_{\sin u'_{P0}}^{\sin u'_{0}} \delta g'_{P0} d(\sin u'_{P0}) \right\} = \Delta W,$$

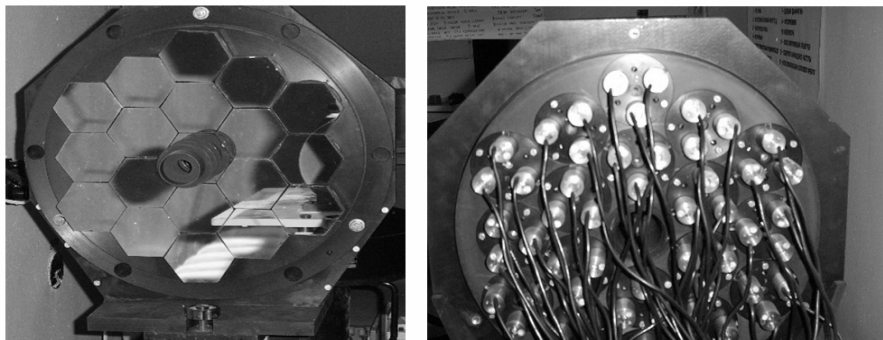
$$\Delta W \vee \delta W.$$

Шаг 14. Если $\Delta W \leq \delta W$, то процесс сборки составного зеркала завершен; если $\Delta W > \delta W$, то переход к интерферометрическим измерениям, т.е. определение положения q_P -го ЗС, для чего требуется дополнительная коррекция.

Шаг 15. Дополнительная коррекция q_P -го ЗС.

Шаг 16. Завершение геометрического и оптического позиционирования.

Алгоритм геометрического позиционирования был реализован на составном зеркале со световым диаметром 0,5 м с 20 управляемыми гексагональными зеркальными сегментами (разработка канд. техн. наук А. Г. Серегина). Макет зеркала приведен на рисунке. При геометрическом позиционировании в течение 1 ч удалось установить 20 зеркал с погрешностью не более 0,01 мм. Аналогичная работа с применением автоколлиматора потребовала 10 ч. Следует отметить, что юстировка составного зеркала диаметром 10,4 м (площадью 73 м²) для телескопа Gran Telescopio CANARIAS длилась около года [7].



Предложенный алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов, в основу которого положен метод компарирования, позволяет решить задачу создания зеркал со световым диаметром более 3 м, что, в свою очередь, позволяет обеспечить автономное поддержание качества составных зеркал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лахтиков В. Б., Серегин А. Г.* Оценка оптимальной конфигурации разреженной апертуры для составного главного зеркала адаптивного телескопа // Оптич. журн. 1997. Т. 64, № 3. С. 127—128.
2. The James Webb Space Telescope [Электронный ресурс]: <<http://www.jwst.nasa.gov/>>.
3. *Parkinson C. L.* Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41 (2). P. 173—183.
4. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.20771 [Электронный ресурс]: <<http://aqua.nasa.gov/>>.
5. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.
6. *Александров П. С.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1979. 512 с.
7. <http://www.gtc.iac.es>.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; заведующий кафедрой; E-mail: dav_60@mail.ru
- Лилия Михайловна Менделеева** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и технологий; E-mail: mendeleevalm@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
18.07.13 г.

УДК 535.32

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, А. М. ГОЛУБЕВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ТОЧНОСТИ

Рассматривается усовершенствованный на основе метода выделения контуров рефрактометр Аббе, позволяющий сделать четкой границу разделения темной и светлой областей поля в окуляре прибора. Для теоретического обоснования повышения точности измерения показателя преломления использован метод Монте-Карло.

Ключевые слова: показатель преломления, рефрактометр Аббе, точность измерений, имитационное моделирование, метод Монте-Карло.

Введение. Одним из перспективных направлений развития технологий приборостроения является компьютеризация традиционных лабораторных приборов, что позволяет расширить возможности улучшения качества исследований и повышения точности измерений [1].

Рефрактометры Пульфриха и Аббе, основанные на явлении полного внутреннего отражения на границе эталонной призмы и рабочей среды, позволяют измерить показатель преломления с необходимой для практических целей точностью. При этом рефрактометр Пульфриха обладает более высокой точностью (10^{-5}) по сравнению с рефрактометром Аббе. Рефрактометр Аббе является прибором, скорее, для массового контроля оптических материалов в целях исключения грубых ошибок при их подборе.