

Алгоритм адаптации составных зеркал на основе метода моментов

Е.Н. Сечак¹, А.А. Румянцев², С.С. Щесняк², В.К. Дубрович²

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

²АО «Научный центр прикладной электродинамики», Менделеевская 8, Санкт-Петербург, Россия, 194100

Аннотация. Рассмотрено применение метода моментов для адаптации и поддержания качества рабочей поверхности составных зеркал. Проведено теоретическое обоснование и экспериментальная апробация замкнутой адаптивной оптической системы с датчиком волнового фронта, основанного на обработке дифракционного изображения точечного источника, и алгоритмом управления, с использованием метода моментов.

1. Введение

Существующие в настоящее время оптико-электронные телескопические комплексы (ОЭТК), как наземного, так и космического базирования при определенных условиях не удовлетворяют возросшим требованиям по сквозному разрешению и чувствительности. Улучшение этих характеристик может быть достигнуто, главным образом, за счет использования новых технических решений и конструкций телескопов, а также технологий их создания и методов юстировки [1]. В частности, для космического базирования ОЭТК надо ориентироваться на имеющиеся средства доставки аппаратуры в космос и обеспечивать необходимые массогабаритные характеристики наблюдательных комплексов.

Главное зеркало (ГЗ) является базовым элементом как для основного оптического тракта телескопа, в который входят вторичное зеркало (ВЗ) и корректор полевых аберраций, так и для «привязки» датчиков различных служебных систем, обеспечивающих оптимальное расположение друг относительно друга в процессе эксплуатации основных элементов оптической схемы и конструкции телескопа. В связи с этим предъявляются высокие требования к геометрическому и оптотехническому позиционированию параметров ГЗ, определяющим положение его оптической оси относительно базовых тыльных поверхностей составного зеркала [1-3]. Главная проблема – изготовление такого по качеству зеркала, которое бы удовлетворяло заданным техническим требованиям – СКО волнового фронта, отраженного от зеркала, в пределах $(0,02 - 0,03)\lambda$, а также сохранение этого достигнутого при изготовлении качества на протяжении всей эксплуатации ГЗ. При решении данной задачи возможно использование адаптивных зеркал, в частности составных [1].

2. Адаптация сегментированного зеркала

В предлагаемой системе используется матрица точечных излучателей, число которых равно числу настраиваемых сегментов. Освещение зеркала может осуществляться как параллельно,

так и последовательно при использовании вращающегося обтюратора. В качестве метода обработки сигналов для определения координат центров тяжести, формы и размеров изображений, формируемых сегментами зеркал используется вычисление моментов изображений. Критерием оптимальной настройки составного зеркала является ориентация всех сегментов зеркала, приводящая к минимизации площадей изображений, формируемых каждым сегментом и заданным координатам их центров изображений.

$$J = \iint |x^2 + y^2| \cdot |E|^2 dx dy \rightarrow \min, \quad (1)$$

где x, y – координаты в плоскости изображения; $E(x, y)$ – амплитуда светового поля.

На рисунке 1 приведена блок-схема системы управления составным зеркалом [4-5].

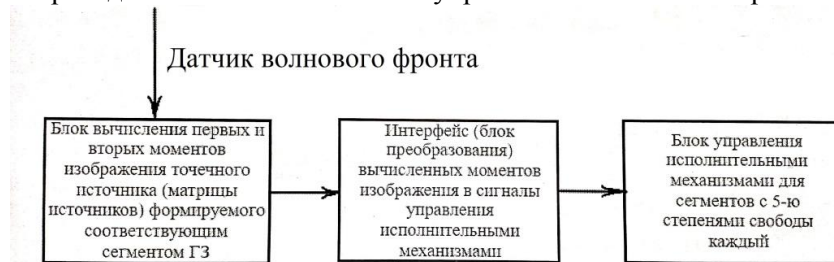


Рисунок 1. Система управления составным зеркалом.

Для проведения исследования были выбраны зеркальные сегменты с 5-ю степенями свободы: два поворота и три сдвига. Для позиционирования сегментов в состояние заданной поверхности используется анализ первых и вторых моментов изображения. Данное решение позволяет существенно ускорить процесс юстировки и избежать неоднозначности нахождения главного минимума [6].

На приемной матрице формируются изображения сопряженных точечных источников. Определим первые I_x, I_y и вторые I_{xx}, I_{yy}, I_{xy} моменты изображения источника:

$$\sum I_x = \Delta l \left[\frac{\sum c \cdot B_{cr}}{\langle B \rangle} - 0,5 \cdot (c_{max} - 1) \right] \quad (2)$$

$$\sum I_y = \Delta l \left[\frac{\sum r \cdot B_{cr}}{\langle B \rangle} - 0,5 \cdot (r_{max} - 1) \right] \quad (3)$$

$$I_{xx} = \Delta l^2 \frac{\sum c^2 \cdot B_{cr}}{\langle B \rangle} - I_x^2 \quad (4)$$

$$I_{yy} = \Delta l^2 \frac{\sum r^2 \cdot B_{cr}}{\langle B \rangle} - I_y^2 \quad (5)$$

$$I_{xy} = \Delta l^2 \frac{\sum c \cdot r \cdot B_{cr}}{\langle B \rangle} - I_x I_y \quad (6)$$

$$\langle B \rangle = \sum_{c,r} B_{cr} \quad (7)$$

где c – номер столбца матрицы; r – номер строки матрицы; Δl – линейный размер пикселя; B_{cr} – яркость точки в позиции (c, r) ; суммирование в формулах (2) – (7) ведется по всем элементам анализируемой области приемной матрицы; c_{max}, r_{max} – количество пикселей анализируемой области по горизонтали и вертикали соответственно.

Нулевой момент $\langle B \rangle$ является нормировочным множителем и пропорционален энергии излучения, падающего на приемную матрицу. Первые моменты I_x, I_y имеют смысл координат центра пятна, вторые моменты I_{xx}, I_{yy}, I_{xy} определяют эффективный размер пятна по осям ОХ и ОУ соответственно. Элементы I_{xx}, I_{yy}, I_{xy} образуют симметричную, положительно определенную матрицу – матрицу ковариации.

Геометрический смысл моментов можно продемонстрировать на примере пятна, имеющего форму эллипса (рис.2). Тогда первые моменты численно равны координатам центра эллипса, а вторые моменты связаны с размерами полуосей эллипса следующим образом:

$$I_{xx} = \frac{b^2}{4}, I_{yy} = \frac{a^2}{4}, I_{xy} = 0 \quad (8)$$

В случае произвольной ориентации эллипса необходимо перейти к базису, связанному с осями эллипса. В этом базисе матрица ковариации будет иметь диагональный вид. Для вычисления параметров эллипса вычисляются собственные числа λ_1, λ_2 и собственные вектора матрицы ковариации u_1, u_2 . Собственные числа матрицы вторых моментов удовлетворяют уравнению:

$$\det(M - \lambda I) = 0 \quad (9)$$

где M – матрица ковариации; I – единичная матрица; \det – определитель матрица.

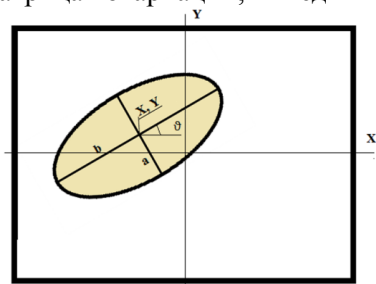


Рисунок 2. Пятно в фокальной области в виде эллипса.

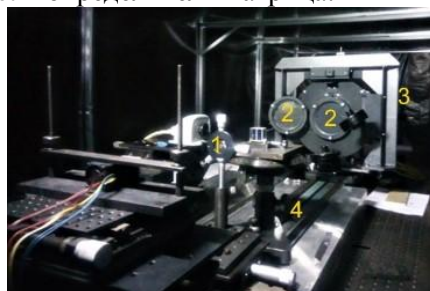


Рисунок 3. Макет стенда. 1 – Датчик волнового фронта, 2 – управляемые сегменты, 3 – платформа сегментированного зеркала, 4 – оптическая скамья.

При расположении матрицы в плоскости изображения источника распределение интенсивности обладает следующими свойствами:

- центр светового пятна, формируемого сегментом, определяется положением соответствующего излучателя в матрице излучателей;
- размер светового пятна на матрице будут минимальны.

Положение центра светового пятна определяется первыми моментами, а вторые моменты имеют минимум, по сравнению с другими положениями.

3. Результаты макетирования

Для апробации алгоритма адаптации был разработан и собран макет стенда, представленный на рисунке 3. В качестве объекта исследования было использовано адаптивное зеркало с сегментами сферической формы. На стенде проводились измерения моментов изображения в зависимости от взаимного расположения элементов макета (сдвиги и наклоны сегментов).

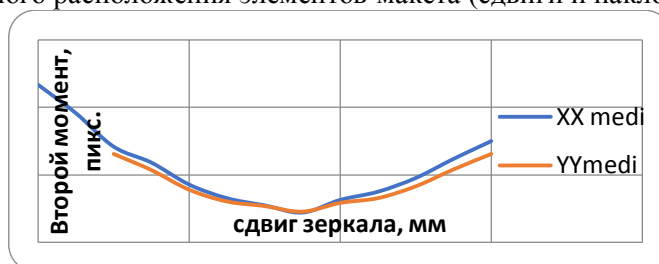


Рисунок 4. Зависимость вторых моментов от сдвига зеркала при освещении белым светом.

Рисунок 4 демонстрирует зависимость эффективного радиуса изображения одного из источников от сдвига соответствующего зеркала. Точка минимума на графике соответствует положению сегмента вдоль оптической оси, когда приемная матрица расположена в плоскости изображения источника. Вычисления моментов проводилось для изображений, обработанных медианным фильтром.

4. Заключение

В ходе работы проведено теоретическое обоснование и экспериментальная апробация замкнутой адаптивной оптической системы с датчиком волнового фронта и алгоритмом

управления, основанном на методе моментов. На первом этапе адаптации (установка сегмента по углу) вычисляются собственные числа и собственные вектора матрицы ковариации и в качестве целевой функции выбирается максимальное собственное число. Критерием установки является минимум максимального собственного числа – $\min(\lambda_{\max})$, λ_{\max} – наибольшее собственное число матрицы ковариации. Минимум ищется по всем поворотам сегмента в направлении собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу.

На втором этапе производится установка сегмента в плоскости перпендикулярной оси распространения света. Критерием установки являются заданные координаты центра пятна.

На третьем этапе производится установка сегмента зеркала по оси распространения света, критерием является минимум суммы $I_{xx} + I_{yy}$.

На первом и третьем этапах минимизация целевой функции производится по методу Ньютона, что обеспечивает быструю сходимость итерации.

5. Литература

- [1] Маламед, Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: уч. Пособие – СПб: Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики (технический ун-т), 2002. – 291 с.
- [2] Демин, А.В. Алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов / А.В. Демин, Л.М. Менделеева // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 51-56.
- [3] Демин, А.В. Алгоритм юстировки составных зеркал / А.В. Демин, П.В. Ростокин // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 291-294. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.
- [4] Тараненко, В.Г. Адаптивная оптика / В.Г. Тараненко, О.И. Шанин – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.
- [5] Шанин, О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика – Москва: Техносфера, 2013. – 296 с.
- [6] Дубрович, В.К. Моделирование процесса адаптации космического телескопа «Миллиметр» / В.К. Дубрович, Д.М. Заика, В.К. Качурин, Г.С. Цема, С.С. Шесняк // Информация и космос. – 2017. – № 4. – С. 39-43.

Adaptation algorithm for composite mirrors by the method of moments

E.N. Sechak¹, A.A. Rumyancev², S.S. Schesnyak², V.K. Dubrovich²

¹ITMO University, Kronverksky pr. 49, St. Petersburg, Russia, 197101

²JSC «SCAE», Mendeleevskaya street 8, St. Petersburg, Russia, 194100

Abstract. Here is considered the possibility of applying the method of moments of adaptation and maintenance of the working surface quality of composite mirrors. A theoretical justification and experimental approbation of a closed adaptive optical system with a wavefront sensor based on the processing of a diffraction image of a point source and a control algorithm using the method of moments is carried out.