

Анализ влияния поперечного смещения пятна рассеяния на восстановление параметров волнового фронта

Т.В. Иванова
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
tvivanova@itmo.ru

О.С. Калинкина
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
oskalinkina@itmo.ru

Е.Ю. Летова
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
letova@niuitmo.ru

Аннотация—Рассмотрено восстановление параметров волнового фронта (коэффициентов разложения по полиномам Цернике) по известному распределению интенсивности в пятне рассеяния. Исследовано влияние погрешности определения центра пятна рассеяния и соответствующего сдвига пятна рассеяния на сходимость алгоритмов. Исследованные методы могут использоваться для подюстировки телескопа в процессе его эксплуатации.

Ключевые слова— функция рассеяния точки, абберации, полиномы Цернике, методы восстановления фазы, определение центра пятна рассеяния

1. ВВЕДЕНИЕ

Контроль качества оптических систем в некоторых случаях, например, для телескопов в процессе эксплуатации, не может использовать традиционный подход с использованием интерферометрических схем. Задача контроля качества юстировки системы в процессе её эксплуатации может быть решена с использованием методов восстановления волнового фронта. Особенно актуальна данная задача для телескопа [1] – контроль по звезде исключает абберации, вносимые атмосферой, а сам метод не требует конструктивных изменений системы.

В данной работе исследуется влияние погрешности определения центра пятна рассеяния, то есть его поперечного смещения, на восстановление параметров волнового фронта, а именно коэффициентов разложения волнового фронта по полиномам Цернике. Определение центра пятна осуществляется модифицированным центром масс [2].

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В контроле оптических систем, а также в проектировании оптических систем волновой фронт обычно описывают при помощи разложения функции волнового фронта (или волновой абберации при проектировании) в ряд по полиномам Цернике [3].

После восстановления волнового фронта в виде коэффициентов разложения при полиномах Цернике, по известным значениям коэффициентов при помощи таблицы влияния параметров из программы для автоматизированного проектирования оптических систем [4] можно определить направления смещений и наклонов элементов, возникших в результате остаточной разъюстировки.

Одной из важных численных характеристик алгоритма восстановления волнового фронта по известному распределению интенсивности в пятне рассеяния является его устойчивость к погрешности определения координат центра пятна рассеяния. Определение центра пятна рассеяния в присутствии несимметричных аббераций является отдельной задачей [2]. В данной работе для анализа устойчивости метода к точности определения центра использовался модифицированный метод центра масс.

В рамках исследования использовались смоделированные пятна рассеяния с разным набором коэффициентов при полиномах Цернике и последовательным изменением поперечного смещения. Величина каждого набора коэффициентов генерировалась случайным образом в диапазоне от $-0,5\lambda$ до $0,5\lambda$, общее среднеквадратическое отклонение волнового фронта при этом было в диапазоне от 0 до $0,6\lambda$.

Восстановление производилось двумя методами – методом параметрической оптимизации [5] и методом Миселя [6]. Особое внимание уделялось устойчивости методов к погрешности определения центра пятна рассеяния.

Метод Миселя восстанавливал волновой фронт, который затем аппроксимировался полиномами Цернике. Погрешность восстановления вычислялась, соответственно, как абсолютная суммарная погрешность между референтными и восстановленными значениями полиномов Цернике. В таблице 1 приведен пример восстановления методом Миселя.

Таблица 1. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ МИСЕЛЯ

Смещение центра по X (пикселей)	Среднеквадратическое отклонение референтного волнового фронта $0,465136\lambda$	
	Количество шагов восстановления	Абсолютная погрешность восстановления по полиномам (λ)
0	57	0,037996
1	59	0,038576
2	63	0,039061
3	67	0,035811
4	65	0,027059
5	122	0,037293

Пример иллюстрирует, что погрешность восстановления не имеет прямой зависимости от величины поперечного смещения, хотя большее смещение требует больше шагов при вычислении. Метод Миселя достаточно устойчив к погрешности определения центра пятна – при среднеквадратическом отклонении волнового фронта не превышающем $0,6\lambda$ метод стабильно сходится при погрешности до 5 пикселей.

Для метода параметрической оптимизации исследования показали, что при среднеквадратическом отклонении волнового фронта не превышающем $0,2\lambda$ метод успешно сходится при погрешности определения центра до 2 пикселей. Для большего среднеквадратического отклонения волнового фронта метод становится более чувствительным к сдвигу пятна, и даже при погрешности в 1 пиксел в некоторых случаях расходится.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Погрешность вычисления центра пятна рассеяния вносит существенный вклад в сходимость методов. Исследования показали, что метод Миселя, стабильно сходящийся при среднеквадратическом отклонении до $0,6\lambda$ более устойчив к погрешности определения центра пятна, чем метод параметрической оптимизации, ограниченный $0,2\lambda$.

Дополнительные коэффициенты при полиномах Цернике, отвечающие за поперечное смещение, усложняют оптимизационную модель, что негативно сказывается на восстановлении.

Предварительная обработка пятен рассеяния – центровка, может повлиять на сходимость алгоритмов, но необходимо учитывать, что на определение центра пятна и смещение влияет не только использованный метод определения центра и величина поперечного смещения (соответствующие коэффициенты при полиномах Цернике), но и другие аберрации, чья форма даёт дополнительное смещение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары; Пер. с англ. Е. В. Мазуровой и др.; Под ред. А.Н. Соснова. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
- [2] Иванова, Т.В. Анализ методов определения центра пятна рассеяния в присутствии аберраций / Т.В. Иванова, Е.Ю. Летова, О.С. Калинкина, Д.В. Никифорова, В.Е. Стригалева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 334–341. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-334-341
- [3] Bezdidko, S.N. Theory of orthogonal aberration and its use in lens design // Optical Review. – 2014. – Vol. 21(5). – P. 1-7.
- [4] OpticStudio – Zemax Web Site [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.zemax.com/pages/opticstudio> (01.12.2016)
- [5] Иванова, Т.В. Анализ влияния расфокусировки на определение параметров волнового фронта телескопа по пятну рассеяния методом параметрической оптимизации / Т.В. Иванова, О.С. Калинкина, Ю.О. Куштышева, Д.С. Завгородний // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 65–72. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-65-72
- [6] Wesner, J. Reconstructing the pupil function of microscope objectives from the intensity PSF / J. Wesner, J. Heil, Th. Sure // Proc. SPIE, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering III. – 2002. – Vol. 4767. – P. 32-43.; DOI: 10.1117/12.451320