

Влияние дефокусировки на корректность детектирования aberrаций волнового фронта с использованием согласованного фильтра

Г.К.Ищанов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
Gumer2001@mail.ru

Аннотация — В данной работе исследуется влияние дефокусировки на точность детектирования aberrаций волнового фронта с использованием многоканального дифракционного оптического фильтра, согласованного с базисом функций Цернике.

Ключевые слова — aberrации волнового фронта, полиномы Цернике, многоканальный дифракционный оптический фильтр, дефокусировка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема детектирования aberrаций волнового фронта одна из самых значимых в оптике и особенно актуальна при конструировании телескопов, микроскопов, в промышленной лазерной технике, в медицине [1-4]. Существует много известных методов решения этой задачи [5-7], которые, однако, обладают как различными достоинствами, так и недостатками, в частности, возможностью применения в узком диапазоне величин aberrаций. Поэтому не перестают появляться новые методы, в том числе, на основе применения цифровых методов интеллектуального анализа [8-10].

В работе [7] для детектирования aberrаций волнового фронта было предложено использовать многоканальный дифракционный оптический фильтр, согласованный с базисом функций Цернике [11]. В данной работе исследуется влияние дефокусировки на точность детектирования aberrаций волнового фронта с использованием такого оптического элемента.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Базисные функции Цернике [11] имеют следующий вид:

$$Z_{nm}(r, \varphi) = \sqrt{\frac{n+1}{\pi r_0^2}} R_n^m(r) \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_n^m(r)$ -радиальные полиномы Цернике.

Aberrации волнового фронта, встречающиеся в оптических системах, обычно описываются в терминах функций Цернике следующим образом:

$$W(r, \varphi) = \exp[i\psi(r, \varphi)], \quad (2)$$

$$\psi(r, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_{nm} Z_{nm}(r, \varphi). \quad (3)$$

Для регистрации различных aberrаций в данной работе используется многоканальный фильтр [7], комплексная функция пропускания которого описывается следующим выражением:

$$\tau(x, y) = \sum_{p=1}^{16} Z_n^m * e^{i(\alpha_p x + \beta_p y)}, \quad (4)$$

Если оптический элемент $\tau(x, y)$ из выражения (4) осветить пучком с волновым фронтом $\exp(i\psi)$, то в фокальной плоскости можно детектировать наличие aberrаций по присутствию корреляционных пиков в соответствующих дифракционных порядках [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вид функции рассеяния точки (ФРТ) для различных aberrаций волнового фронта можно получить с использованием преобразования Фурье. На рис. 1 показана амплитуда ФРТ в фокальной плоскости линзы для aberrации в виде суперпозиции функций Цернике: $\exp[i(C_1 Z_4^4 + C_2 Z_4^2 + C_3 Z_3^1 + C_4 Z_2^2)]$. Чтобы получить изображение ФРТ при дефокусировке, используется преобразование Френеля (рис. 2, $z = 1000$ мм). Как видно, ФРТ заметно меняется при дефокусировке.

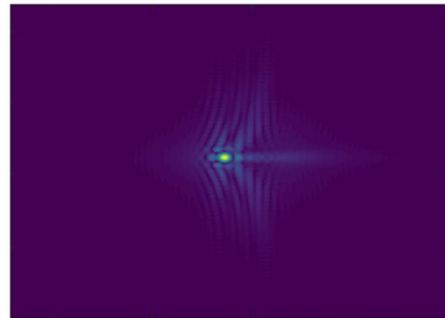


Рис. 1. Амплитуда ФРТ в фокальной плоскости для волнового фронта, соответствующего суперпозиции полиномов $Z_4^4, Z_4^2, Z_3^1, Z_2^2$ с коэффициентами $C_1 = 3, C_2 = 3, C_3 = 2, C_4 = 3$

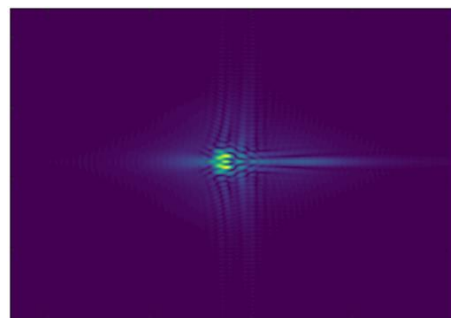


Рис. 2. Амплитуда ФРТ во внефокальной плоскости ($z = 1000$ мм) для волнового фронта, соответствующего суперпозиции полиномов $Z_4^4, Z_4^2, Z_3^1, Z_2^2$ с коэффициентами $C_1 = 3, C_2 = 3, C_3 = 2, C_4 = 3$

На рис. 3 показано действие многоканального фильтра (4), согласованного с 16-ю полиномами Цернике, при освещении плоской волной. А на рис. 4 показан аналогичный результат при освещении фильтра (4) пучком с aberrированным волновым фронтом, ФРТ которого показана на рис. 1.

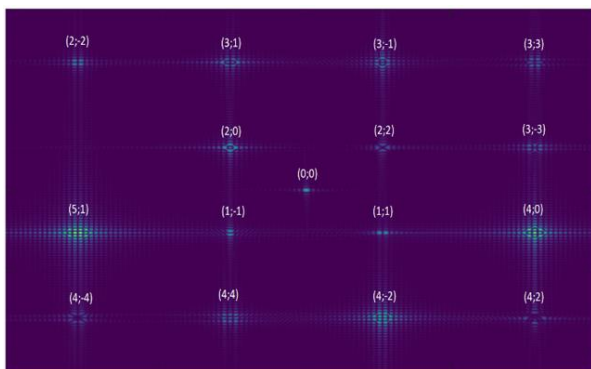


Рис. 3. Действие многоканального фильтра, согласованного с 16-ю полиномами Цернике, при освещении плоской волной

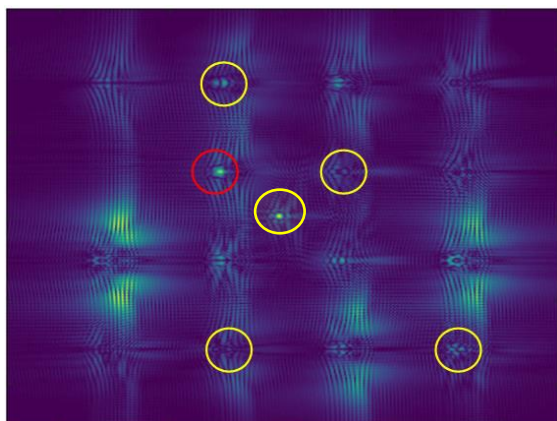


Рис. 4. Детектирование aberrаций волнового фронта, описываемых суперпозицией полиномов $Z_4^4, Z_2^2, Z_4^2, Z_3^1$ при $C_1 = 3, C_2 = 3, C_3 = 2, C_4 = 3$, с использованием многоканального фильтра (4) в фокальной плоскости

На рис. 5 показан аналогичный результат при дефокусировке (для расчетов использовано преобразование Френеля при $z = 1000$ мм).

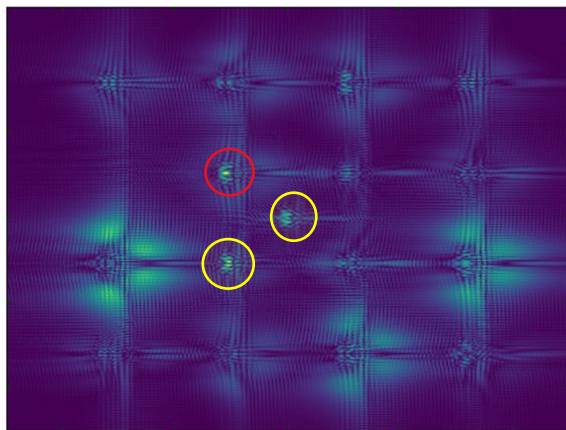


Рис. 5. Детектирование aberrаций волнового фронта, описываемых суперпозицией полиномов $Z_4^4, Z_2^2, Z_4^2, Z_3^1$ при $C_1 = 3, C_2 = 3, C_3 = 2, C_4 = 3$, с использованием многоканального фильтра (4) при дефокусировке ($z = 1000$ мм)

На рис. 4 отчетливо видны корреляционные пики в центрах соответствующих дифракционных порядков (показаны желтыми окружностями). Отметим также наличие ложного корреляционного пика в

дифракционном порядке, соответствующем Z_0^2 (это aberrация дефокусировки, которая очень часто детектируется даже в реальных оптических системах [3]).

Как можно заметить по результатам, приведенным на рис. 5, при смещении из фокальной плоскости корреляционные пики искажаются и пропадают, что негативно влияет на корректность детектирования aberrаций волнового фронта с использованием согласованного фильтра [7].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе численного моделирования исследован вид ФРТ для волнового фронта в виде суперпозиции aberrаций в фокальной плоскости и при дефокусировке. Была показана потеря корректности детектирования aberrаций волнового фронта при помощи многоканального фильтра, согласованного с базисом функций Цернике, при смещении из фокальной плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhao, Q. Effect of optical aberration of telescopes to the laser radar / Q. Zhao, H. Fan, S. Hu, M. Zhong, L. Baida // Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7656. – P. 76565Z.
- [2] Booth, M. Aberrations and adaptive optics in superresolution microscopy / M. Booth, D. Andrade, D. Burke, B. Patton, M. Zurasukas // Microscopy. – 2015. – Vol. 64(4). – P. 251–261.
- [3] Хорин, П.А. Анализ aberrаций роговицы человеческого глаза / П.А. Хорин, С.Н. Хонина, А.В. Карсаков, С.Л. Бранчевский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 810–817.
- [4] Клебанов, Я.М. Компенсация aberrаций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа / Я.М. Клебанов, А.В. Карсаков, С.Н. Хонина, А.Н. Давыдов, К.А. Поляков // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 30–36.
- [5] Neil, M.A.A. New modal wave-front sensor: a theoretical analysis / M.A.A. Neil, M.J. Booth, T. Wilson // J. Opt. Soc. Am. A. – 2000. – Vol. 17(6). – P. 1098–1107.
- [6] Artzner, G. Microlens arrays for Shack-Hartmann wavefront sensors / G. Artzner // Opt. Eng. – 1992. – Vol. 31(6). – P. 1311–1322.
- [7] Khonina, S.N. Wavefront aberration sensor based on a multichannel diffractive optical element / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // Sensors. – 2020. – Vol. 20(14). – P. 3850.
- [8] Родин, И.А. Распознавание типов aberrаций волнового фронта, соответствующих отдельным функциям Цернике, по картине функции рассеяния точки в фокальной плоскости с применением нейронных сетей / И.А. Родин, С.Н. Хонина, П.Г. Серафимович, С.Б. Попов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 923–930.
- [9] Wang, K. Deep learning wavefront sensing and aberration correction in atmospheric turbulence / K. Wang, M. Zhang, J. Tang, L. Wang, L. Hu, X. Wu, W. Li, J. Di, G. Liu, J. Zhao // Photonix. – 2021. – Vol. 2(1). – P. 8.
- [10] Khonina, S.N. Analysis of the wavefront aberrations based on neural networks processing of the interferograms with a conical reference beam / Khonina, P.A. Khorin, P.G. Serafimovich, A.P. Dzyuba, A.O. Georgieva, N.V. Petrov // Applied Physics B. – 2022. – Vol. 128(3). – P. 60.
- [11] Born, M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light / M. Born, E. Wolf // Cambridge University Press: Cambridge, 1999.