

Применение датчика волнового фронта на основе согласованной фильтрации для настройки коллиматора лазерного излучения

П.А. Хорин

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
paul.95.de@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2248-614X

А.П. Порфирьев

Институт систем обработки изображений – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
porfirev.alexey@ipsiras.ru
ORCID: 0000-0003-1297-4438

Аннотация—В работе исследуется эффективность применения двух типов датчиков волнового фронта на основе многоканального дифракционного оптического элемента для точной настройки коллиматора лазерного излучения. Один датчик согласован с базисными функциями Цернике, а второй с волновыми aberrациями. Выполнен сравнительный анализ полученных численных и экспериментальных результатов.

Ключевые слова— функции Цернике, датчик волнового фронта, многоканальные дифракционные оптические элементы, коллиматор.

1. ВВЕДЕНИЕ

Контроль качества, юстировка и сведения оптических осей каналов многоканальных приборов является актуальной задачей [1]. Обычно для коллимации лазерного излучения используется специальный прибор – коллиматор. Данное устройство предназначено для получения парааксиальных оптических пучков. Оптические коллиматоры часто используются для калибровки и юстировки оптических устройств [2], чтобы проверить, все ли элементы выровнены по оптической оси, и установить элементы на правильном фокусном расстоянии. Также оптический коллиматор можно применять для контроля сложных измерительных инструментов и определения их коллимационной ошибки [3].

В рамках данной работы рассматриваются два многоканальных дифракционных оптических элемента (ДОЭ), согласованные с полиномами Цернике и волновыми aberrациями, для настройки коллиматора лазерного излучения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим круговые полиномы Цернике, которые представляют собой полное множество ортогональных функций на круге единичного радиуса [4]:

$$Z_{nm}(r, \varphi) = Z_N(r, \varphi) = A_n R_n^m(r) \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

где $R_n^m(r)$ – радиальные полиномы Цернике :

$$R_n^m(r) = \sum_{p=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^p (n-p)!}{p! \left(\frac{n+m}{2} - p\right)! \left(\frac{n-m}{2} - p\right)!} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-2p}, \quad (2)$$

A_n – нормирующий множитель:

$$A_n = \sqrt{(n+1)/\pi}. \quad (3)$$

Аберрации волнового фронта, встречающиеся в оптических системах, обычно описываются в терминах функций Цернике следующим образом [5]:

$$W(r, \varphi) = \exp[i\psi(r, \varphi)], \quad (4)$$

$$\psi(r, \varphi) = 2\pi\alpha \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n c_{nm} Z_{nm}(r, \varphi). \quad (5)$$

Рассмотрим многоканальный фильтр [6], функция пропускания которого будет иметь следующий вид:

$$\tau(x, y) = \sum_{N=1}^{N_0} \tilde{\tau}(x, y) \exp[i(a_N x + b_N y)], \quad (6)$$

где N_0 – количество функций, закодированных в фильтре; $\tilde{\tau}(x, y) = \psi(x, y)$ – фильтр, согласованный с полиномами Цернике, $\tilde{\tau}(x, y) = W(x, y)$ – фильтр, согласованный с волновыми aberrациями, a_N, b_N – параметры смещения дифракционного порядка относительно центра фильтра.

В качестве коллиматора лазерного излучения рассматривается оптическая схема (рис. 1), которая состоит из следующих элементов: РН – точечное отверстие (40 мкм); L – сферическая линза ($f = 350$ мм); D – круглая диафрагма. Для регистрации полученного изображения используется камера САМ – видеокамера TourCam UCMOS08000KPB с разрешением 3264×2448 и размером пикселя 1,67 мкм. Источник света в виде Гауссова пучка (Laser) – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм).

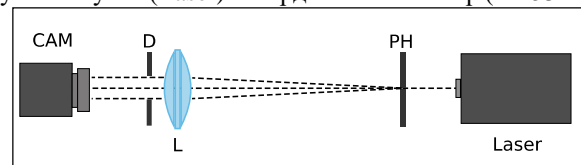


Рис. 1. Схема экспериментальной установки коллиматора лазерного излучения (Laser – твердотельный лазер, РН – точечное отверстие; L – сферическая линза; D – круглая диафрагма, САМ – видеокамера)

Для настройки рассматриваемого коллиматора предлагается дополнить оптическую схему пространственным модулятором света (ПМС) HOLOEYE LC 2012 с разрешением 1024×768 пикселей и размером пикселя 36 мкм, работающим на пропускание лазерного излучения. ПМС позволяет закодировать комплексную функцию пропускания (6) для разложения исследуемого светового поля по функциям Цернике или волновым aberrациям соответственно. Оптическая схема для настройки коллиматора лазерного излучения представлена на рис. 2.

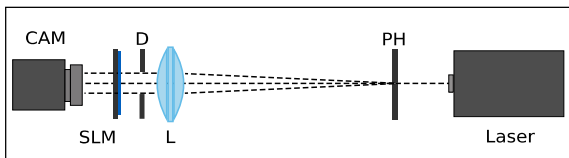


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для настройки коллиматора лазерного излучения (Laser - твердотельный лазер, PH – точечное отверстие; L - сферическая линза; D - круглая диафрагма, SLM пропускающий ПМС, CAM – видеокамера)

Если лазерное излучение точно коллимировано, то в центрах дифракционных порядков для фильтра, согласованного с полиномами Цернике, наблюдается отсутствие корреляционных пиков. В случае, если хотя бы в одном из дифракционных порядков регистрируется корреляционный пик, то это индикатор того, что коллиматор сформировал не параксиальный пучок. Известно [7], что фильтр (6), согласованный с полиномами Цернике хорошо детектирует именно малые отклонения волнового фронта от эталонного (до $0,4\lambda$). Таким образом можно говорить о точной настройке коллиматора при малых коллимационных ошибках, а по типу детектированной aberrации можно определить причину полученной ошибки.

Что касается фильтра, согласованного с волновыми aberrациями – при точно коллимированном лазерном излучении в центрах дифракционных порядков будут наблюдаться функции рассеяния точки (ФРТ) советующих aberrации. В случае, если хотя бы в одном из дифракционных порядков регистрируется изменение структуры ФРТ, то это индикатор того, что коллиматор сформировал не параксиальный пучок и требуется дополнительная настройка. Причём данный вид настройки предлагается использовать для определения диапазона коллимационных ошибок. Известно [8], что фильтр (6), согласованный с волновыми aberrациями хорошо детектирует средние (от $0,25\lambda$ до $0,4\lambda$) и большие (от $0,4\lambda$ до λ) отклонения волнового фронта.

Проведём численный и оптический эксперимент, в котором выполним точную настройку коллимации лазерного излучения Гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 532$ нм. На рис. 3 представлена интенсивность точно коллимированного лазерного излучения после прохождения фильтра (6) и схематическое расположение закодированных функций в соответствующих дифракционных порядках (рис. 3 (а, в) – $\tilde{\tau}(x, y) = \psi(x, y)$ – фильтр, согласованный с полиномами Цернике; рис. 3 (б, г) – $\tilde{\tau}(x, y) = W(x, y)$ – фильтр, согласованный с волновыми aberrациями).

Из результатов, полученных в численном и оптическом эксперименте, видно, что при действии второго фильтра (рис. 3 (б, г)) ни в одном дифракционном порядке не наблюдается значительного изменения структуры ФРТ относительно эталонных (рис. 3 (д)). Это говорит о настройке коллиматора лазерного излучения с хорошей точностью, но для более точной оценки необходимо использовать первый фильтр. Первый фильтр (рис. 3 (а, в)) не детектировал ни в одном центре ни одного из дифракционных порядков корреляционный пик (в центральном – шум, в (2,0) засветка). Это говорит о высокой точности настройки коллиматора лазерного излучения.

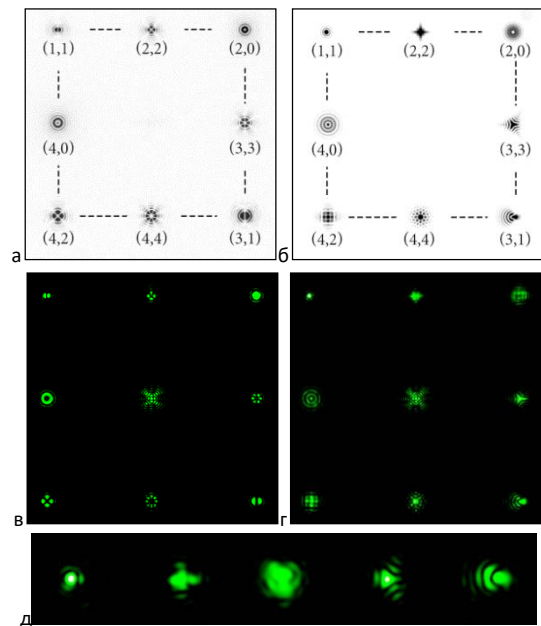


Рис. 3. Результаты численного и оптического эксперимента: фильтр, согласованный с (5) (а – численное моделирование, в – опт. эксперимент); фильтр, согласованный с (4) (б – численное моделирование, г – опт. эксперимент, д – эталонные ФРТ для aberrации (1,1) (2,2) (2,0) (3,3) (3,1) соответственно)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможности применения двух типов датчиков волнового фронта на основе многоканального ДОЭ для настройки коллиматора лазерного излучения. Датчик, согласованный с волновыми aberrациями, эффективен для оценки диапазона коллимационных ошибок, а сенсор с базисными функциями Цернике – для точной настройки коллиматора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-37-90129).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абраменко, А.А. Калибровка взаимного расположения стереокамеры и трёхмерного сканирующего лазерного дальномера / А.А. Абраменко // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 220-230. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-220-230.
- [2] Silva, D.E. A simple interferometric technique for collimation testing // Appl Opt. – 1971. – Vol. 10(8). – P. 1980-1982.
- [3] Chee, S. New Optical Design Method of Floating Type Collimator for Microscopic Camera Inspection / S. Chee, J. Ryu, H. Choi // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11. – P. 6203. DOI:10.3390/app11136203.
- [4] Born, M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light / M. Born, E. Wolf. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] Booth, M.J. Direct measurement of Zernike aberration modes with a modal wavefront sensor // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5162. – P. 79-90.
- [6] Karpeev, S.V. Transverse mode multiplexing by diffractive optical elements / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, S.N. Khonina, M. Duparre // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5854. – P. 1-12.
- [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. – P. 3850. DOI: 10.3390/s20143850.
- [8] Хорин, П.А. Оптическое детектирование величины отдельных aberrаций при помощи многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике / П.А. Хорин, С.Г. Волоотовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 525-533. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-906.