

Сравнительный анализ чувствительности интерферограмм к абберациям волнового фронта, записанных с плоскими и цилиндрическими опорными пучками

П.А. Хорин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
khorin.pa@ssau.ru

А.П. Дзюба
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
alexeydzzyuba98@gmail.com

Н.В. Петров
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
n.petrov@niuitmo.ru

Аннотация — В работе исследуется чувствительность интерферограмм, сформированных при помощи структурированных опорных пучков. Проведён выбор параметров опорного пучка для улучшения визуализации аббераций в интерферограммах. На основе численных данных о средних квадратичных ошибках показан сравнительный анализ усреднённых по видам аббераций значений чувствительности.

Ключевые слова — функции Цернике, интерферограмма, дифракционные оптические элементы, опорные пучки

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометрия является одним из самых точных методов регистрации аббераций волнового фронта [1]. Однако недостатки интерферометрии общеизвестны – это трудоёмкость расшифровки интерферограмм и чувствительность измерительной аппаратуры к вибрациям. Классическим опорным пучком в интерферометрических датчиках является плоский волновой фронт, так как в этом случае для восстановления фазы можно использовать простой алгоритм, основанный на преобразовании Фурье [2]. Однако в последнее время для распознавания волнового фронта по интерференционным картинам все чаще применяют интеллектуальный анализ данных и нейронные сети [3]. Время обработки одной интерферограммы составляет несколько микросекунд. Поэтому появляется возможность динамической расшифровки. В этом случае появляется значительная свобода выбора для структуры опорного пучка.

В рамках данной работы рассматриваются два опорных пучка с плоским и цилиндрическим волновым фронтом для оценки чувствительности предложенных интерферограмм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

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

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

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

A_n – нормирующий множитель:

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

Абберации волнового фронта, встречающиеся в оптических системах, обычно описываются в терминах функций Цернике следующим образом [4]:

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

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

Интерференция двух полей регистрируется по интенсивности следующего распределения:

$$I(x, y) = |E_w(x, y) + E_B(x, y)|^2, \quad (6)$$

где $E_w(x, y)$ – анализируемое поле, например, абберированный волновой фронт, $E_B(x, y)$ – опорный пучок.

В качестве опорного пучка, как правило, используют некоторый эталонный волновой фронт (например, плоский, сферический, вихревой):

$$E_B(x, y) = \exp[iB(x, y)]. \quad (7)$$

В данной работе мы рассматриваем два типа опорных пучков: плоский наклонный пучок $B_{p=1}(x, y) = \alpha x + \beta y$ (p – тип опорного пучка; α, β – параметры, определяющие наклон пучка), и цилиндрический пучок $B_{p=2}(x, y) = \alpha x^3$ (α – параметр, определяющий угол наклона цилиндрического фронта к оптической оси).

Таким образом, в рассматриваемом случае интенсивность интерферограмм (6) пропорциональна следующему выражению:

$$I_p(x, y) \cong 1 + \cos[W(x, y) - B_p(x, y)]. \quad (8)$$

Очевидно, частота полос интерферограммы в основном будет зависеть от параметров опорного пучка, а сложность формируемой картины определяется как типом опорного пучка, так и абберацией волнового фронта.

Таблица 1. КАРТИНЫ ИНТЕРФЕРОГРАММ ($\alpha=10, \beta=0$) ДЛЯ АБЕРРАЦИЙ В ВИДЕ ОТДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ЦЕРНИКЕ

Тип aberrации $Z_{nm}(x, y)$	Фаза $W(x, y)$ ($c_{nm} = 0,5$)	Линейная $I_{p=1}(x, y)$ интерферограмма ($c_{nm} = 0,1, c_{nm} = 0,5$)	Цилиндрическая $I_{p=2}(x, y)$ интерферограмма ($c_{nm} = 0,1, c_{nm} = 0,5$)
$Z_{31}(x, y)$			
$Z_{44}(x, y)$			

Как видно из приведенных в таблице 1 интерферограмм, оба типа демонстрируют значительные различия картин (искажение интерференционных линий) при высоких уровнях aberrаций ($c_{nm} = 0,5$), т.е. они могут быть успешно использованы для анализа aberrаций в ситуации, когда разложение по функциям Цернике приводит к заметным ошибкам распознавания [5]. Чтобы количественно оценить чувствительность распознавания рассматриваемых типов интерферограмм введём параметр S , соответствующий величине среднего квадратичного отклонения (СКО) интерферограммы типа p , формируемой aberrированным волновым фронтом $I_p(x, y)$, от интерферограммы, соответствующей отсутствию aberrаций $I_{0p}(x, y)$:

$$S_p = \sqrt{\frac{\iint [I_p(x, y) - I_{0p}(x, y)]^2 dx dy}{\iint I_{0p}^2(x, y) dx dy}}. \quad (9)$$

Увеличение отклонения (8) для одного типа интерферограмм по сравнению с другим должно приводить к повышению эффективности распознавания. Это предположение подтверждается более устойчивым распознаванием интерферограмм с конической опорной волной по сравнению с плоской опорной волной [6]. Для наглядности введена величина Δ – чувствительность распознавания интерферограмм методами машинного обучения:

$$\Delta = (S_2 - S_1) / C_{nm}, \quad (10)$$

соответствующая разности величин СКО цилиндрических ($p=2$) и линейных ($p=1$) интерферограмм и усредненная чувствительность:

$$\bar{\Delta} = (\bar{S}_2 - \bar{S}_1) / C_{nm}, \quad (11)$$

где $\bar{S}_p = \sum_{q=1}^Q S_{pq}$, p – тип интерферограммы, q – тип aberrации, Q – количество рассматриваемых aberrации ($Q=8$) для различных типов и уровней aberrаций. Если $\Delta \geq 0$, то чувствительность цилиндрической интерферограммы выше линейной, иначе чувствительность ниже.

На рис. 1 показаны графики усредненной чувствительности $\bar{\Delta}$ по различным типам aberrаций ($Q=8$) цилиндрических и линейных интерферограмм при вариациях параметра α и c_{nm} . Из графиков на рис. 1 видно, что для малых aberrаций $c_{nm} \leq 0,3$ цилиндрическая интерферограмма не является более чувствительнее, чем линейная.

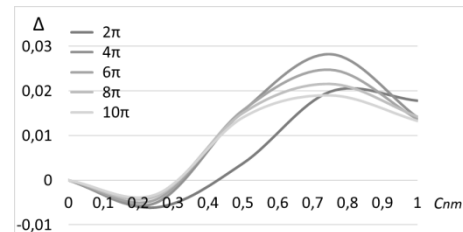


Рис. 1. Усреднённые значения чувствительности цилиндрических и линейных интерферограмм

При средней величине aberrаций $0,3 < c_{nm} < 0,7$ цилиндрические интерферограммы более чувствительны, чем линейные, независимо от параметра α . При больших уровнях aberrаций $c_{nm} > 0,7$ цилиндрические интерферограммы также устойчиво чувствительнее линейных.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование чувствительности интерферограмм, сформированных при помощи структурированных опорных пучков с плоским и цилиндрическим волновым фронтом. Максимум чувствительности цилиндрических интерферограмм достигается при детектировании средних и сильных aberrаций $c_{nm} > 0,7$. В этом случае цилиндрическая интерферограмма чувствительнее линейной на 0,03. Средняя чувствительность при детектировании сильных aberrаций независимо от угла наклона α составляет 0,025.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Malacara, D. Optical Shop Testing // John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [2] Gao, W. Real-time 2D parallel windowed Fourier transform for fringe pattern analysis using Graphics Processing Unit / W. Gao, N.T. Huyen, H.S. Loi, Q. Kemao // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 23147–23152.
- [3] Liu, X. Fast demodulation of single-shot interferogram via convolutional neural network / X. Liu, Z. Yang, J. Dou, Z. Liu // Optics Communications. – 2021. – Vol. 487. – P. 126813.
- [4] Born, M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light / M. Born, E. Wolf. – Cambridge: Cambridge University Press, 7th ed, 1999.
- [5] Khorin, P.A. Analysis of the threshold sensitivity of a wavefront aberration sensor based on a multi-channel diffraction optical element / P.A. Khorin, S.G. Volotovskiy // Proc. SPIE. – 2021. – Vol. 11793. – 117930B.
- [6] Khonina, S.N. Analysis of the wavefront aberrations based on neural networks processing of the interferograms with a conical reference beam / S.N. Khonina, P.A. Khorin, P.G. Serafimovich, A.P. Dzyuba, A.O. Georgieva, N.V. Petrov // Appl. Phys. B. – 2022. – Vol. 128. – 60.