

Оптическое детектирование величины отдельных aberrаций при помощи многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике

П.А. Хорин¹, С.Г. Волотовский², С.Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

В данной работе исследуется применение многоканального датчика волнового фронта, согласованного с фазовыми распределениями в виде функций Цернике, для определения типа и величины aberrации в исследуемом волновом фронте. Подход основан на поэтапной компенсации aberrаций волнового фронта на основе динамически перестраиваемого пространственного модулятора света. В качестве критериев успешного детектирования рассмотрены не только величина корреляционного пика, но и максимальная интенсивность, компактность и ориентация распределения в каждом дифракционном порядке. На основе численного моделирования показана работоспособность предложенного подхода для детектирования как слабых, так и сильных (до длины волны) aberrаций волнового фронта.

Ключевые слова: aberrации волнового фронта, функции Цернике, датчик волнового фронта, многоканальный дифракционный оптический элемент.

Цитирование: Хорин, П.А. Оптическое детектирование величины отдельных aberrаций при помощи многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике / П.А. Хорин, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 525-533. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-906.

Citation: Khorin PA, Volotovskiy SG, Khonina SN. Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions. Computer Optics 2021; 45(4): 525-533. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-906.

Введение

Задача измерения и коррекции aberrаций волнового фронта часто встречается в оптике, например, в конструировании наземных телескопов, в системах оптической коммуникации, в промышленной лазерной технике, в медицине и пр. [1–14]. Практически всегда измерение искажений волнового фронта выполняется с целью их компенсации, в частности, средствами адаптивной или активной оптики [15–20]. Основными причинами aberrаций волнового фронта являются турбулентность атмосферы, неидеальность форм оптических элементов системы, погрешности при юстировке системы и др.

Известно, что слабые aberrации ($\leq 0,4\lambda$) волнового фронта хорошо детектируются с использованием пространственных фильтров, согласованных с базисом функций Цернике [21–26], в том числе при помощи многоканальных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [27–30]. При усилении aberrации линейная аппроксимация волнового фронта становится неприемлемой [29, 30]; это объясняется тем, что вклад второго и последующих слагаемых разложения волнового фронта в ряд Тейлора становится более значительным, что приводит к детектированию ложных aberrаций.

При сильных aberrациях ($> 0,4\lambda$), когда происходит существенное размытие фокального пятна, имеет

смысл применять методы, ориентированные на анализ картины распределения интенсивности, формируемой aberrированной оптической системой в одной или нескольких плоскостях. Для определения волнового фронта в этом случае используются итерационные [31–35] и оптимизационные алгоритмы [10, 36], в том числе с применением нейронных сетей [37–42]. В свою очередь, этот подход демонстрирует значительные погрешности при малых aberrациях, когда функция рассеяния точки (ФРТ) близка к картине Эйри идеальной системы [31].

Таким образом, различные методы работоспособны при различных уровнях aberrаций, и чтобы их применять, желательно определить этот уровень. Одним из решений может быть применение дополнительной оптической и цифровой обработки, например, на основе динамически перестраиваемого пространственного модулятора света (ПМС).

В данной работе для определения типа и величины aberrации в исследуемом волновом фронте предлагается использовать многоканальный фильтр, согласованный с фазовыми распределениями в виде функций Цернике. Динамическая перестройка фильтра позволяет как менять набор анализируемых типов aberrаций, так и варьировать их величину. В качестве критериев успешного детектирования рассмотрены не только величина корреляционного пика, но и мак-

симальная интенсивность, компактность и ориентация распределения в каждом дифракционном порядке. На основе численного моделирования показана работоспособность предложенного подхода для детектирования как слабых, так и сильных aberrаций волнового фронта (от 0,1λ до λ).

1. Теоретические основы

Рассмотрим круговые полиномы Цернике, которые представляют собой полное множество ортогональных функций с угловыми гармониками в круге единичного радиуса:

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

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

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

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

$$W(r, \varphi) = \exp[i\psi(r, \varphi)], \quad (3)$$

$$\psi(r, \varphi) = \alpha \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n C_{nm} Z_{nm}(r, \varphi), \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения, α – уровень aberrации в долях длины волны, коэффициенты C_{nm} нормированы.

Функция рассеяния точки (ФРТ) для оптической системы, имеющей aberrации, может быть вычислена с использованием преобразования Фурье:

$$F(u, v) = \mathfrak{F}\{W(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(x, y) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (ux + vy)\right] dx dy, \quad (5)$$

где λ – длина волны; f – фокусное расстояние линзы.

Для анализа волнового фронта будем использовать многоканальный фильтр с комплексной функцией пропускания следующего вида:

$$\tau(x, y) = \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q \Psi_{pq}^*(x, y) \exp[i(a_{pq}x + b_{pq}y)], \quad (6)$$

где $\Psi_{pq}(x, y)$ – функции, с которыми согласован соответствующий дифракционный порядок, положение которого в фокальной плоскости определяется пространственными частотами a_{pq} и b_{pq} .

Как правило, для анализа волнового фронта используют в качестве $\Psi_{pq}(x, y)$ функции (1) [7, 8, 27, 29, 30]. Однако корректное детектирование в этом случае возможно только при малых уровнях aberrаций. В работах [29, 30] было показано, что при уровне

aberrации более 0,4λ использование такого фильтра приводит к ложному детектированию.

Табл. 1. Соответствие функций Цернике типам aberrаций

N	n	m	Тригонометрическое представление	Вид aberrации
0	0	0	1	Constant
1	1	1	2r cos(φ)	Tilt
2	2	2	√6r² cos(2φ)	Astigmatism
3	2	0	√3(2r² - 1)	Defocus
4	3	3	2√2r³ cos(3φ)	Zero curvature Coma (Trefoil)
5	3	1	2√2(3r³ - 2r) cos(φ)	Pure coma
6	4	4	√10r⁴ sin(4φ)	Quadrofoil
7	4	2	√10(4r⁴ - 3r²) cos(2φ)	2 th order Astigmatism
8	4	0	√5(6r⁴ - 6r² + 1)	Spherical

В данной работе предлагается использовать фильтр, согласованный с фазовыми функциями Цернике:

$$\Psi_{pq}(x, y) = \exp[ik\alpha_k Z_{pq}(x, y)]. \quad (7)$$

Очевидно, для определения уровня некоторой aberrации в волновом фронте необходимо иметь в фильтре набор функций (7) с различными α_k . Таким образом, можно получить фильтр, настроенный на одну конкретную волновую aberrацию с величиной в диапазоне от α_1 до $\alpha_{k_{max}}$.

Для того, чтобы детектировать другой тип волновой aberrации, необходимо каждый канал разбить на N_{max} дополнительных каналов. Для этого в разных дифракционных порядках должны быть закодированы разные волновые aberrации с различными α_k . Функция пропускания такого фильтра будет иметь следующий вид:

$$\tau(x, y) = \sum_{N=1}^{N_{max}} \sum_{k=1}^{K_{max}} \exp[-i2\pi\alpha_k Z_N(x, y)] \times \exp[i(a_{kN}x + b_{kN}y)]. \quad (8)$$

Стоит заметить, что количество каналов фильтра ограничено разрешающей способностью дифракционного оптического элемента, а точность величины детектируемой aberrации напрямую зависит от количества каналов $K_{max} N_{max}$.

Так как фильтр (8) можно реализовать на основе динамического транспаранта, например, жидкокристаллического модулятора света, то число каналов можно сократить за счёт определённой задержки по времени на перестройку фильтра на разные наборы каналов. Более того, при наличии дополнительного адаптирующего устройства можно организовать итерационный процесс пошаговой компенсации aberrации [33 – 35].

Критерием успешной компенсации может считаться формирование корреляционного пика в одном из дифракционных порядков.

2. Численное моделирование

Зададим анализируемое поле как волновой фронт (3)–(4), содержащий функцию Цернике $(n, m) = (3, 1)$ (соответствует коме, $N=5$) с величиной, равной $\alpha = 0,5\lambda$.

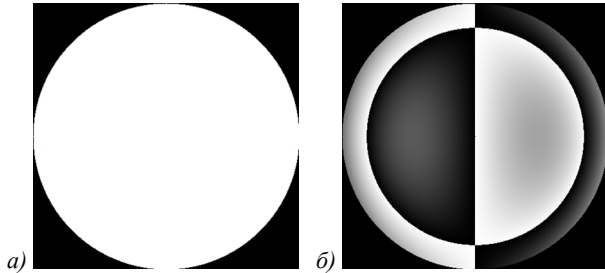


Рис. 1. Амплитуда (а) и фаза (б) волнового фронта, искажённого aberrацией типа кома $(n, m) = (3, 1)$ ($N = 5$) величиной $\alpha = 0,5\lambda$

2.1. Согласование фильтра с типом aberrации

Рассмотрим сначала фильтр (8), настроенный на различные типы aberrаций (функции Цернике) с одинаковым уровнем α_k :

$$\tau(x, y) = \sum_{N=1}^{N_{max}} \exp[-i2\pi\alpha_0 Z_N(x, y)] \times \exp[i(a_N x + b_N y)]. \tag{9}$$

На рис. 2 показана амплитуда и фаза 8-канального фильтра с функцией пропускания (9), согласованного с фазовыми функциями Цернике при $\alpha_0 = 0,1\lambda$. Соответствие дифракционных порядков индексам функций показано на рис. 2.

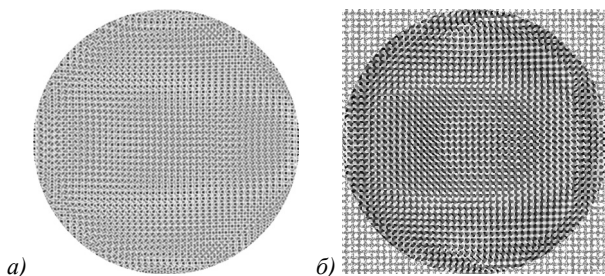


Рис. 2. Амплитуда (а) и фаза (б) 8-канального фильтра (9) при $\alpha_0 = 0,1\lambda$

Подадим на вход фильтра (9), настроенного на уровень aberrаций $\alpha_0 = 0,1\lambda$, анализируемый волновой фронт, содержащий функцию Цернике (3, 1) ($N=5$) с уровнем $\alpha = 0,5\lambda$. Отметим, что уровень анализируемой aberrации значительно превышает (в 5 раз) уровень, на который настроен фильтр. Очевидно, в этом случае не ожидается какой-либо компенсации, что хорошо видно на рис. 4 – ни в одном дифракционном порядке не наблюдается корреляционный пик.

Однако наибольшая интенсивность (рис. 5) всё же детектируется в центре соответствующего дифракционного порядка с индексом $N=5$ (по табл. 1 соответствует aberrации типа (3, 1) – Pure coma).

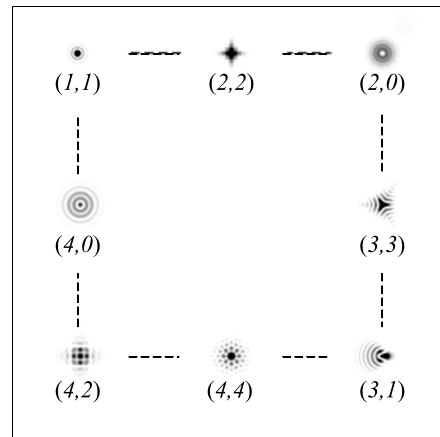


Рис. 3. Схема соответствия индексов фазовых функций Цернике дифракционным порядкам фильтра (9)

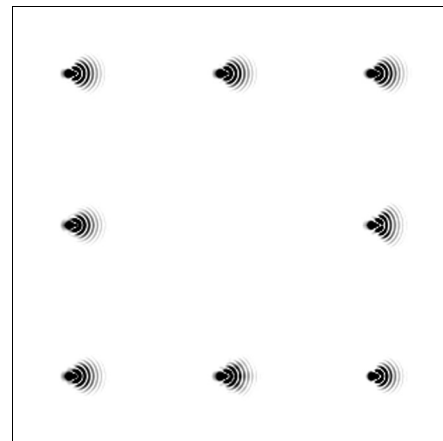


Рис. 4. Действие фильтра (9) с $\alpha_0 = 0,1\lambda$ при анализе aberrации $N = 5$ с $\alpha = 0,5\lambda$

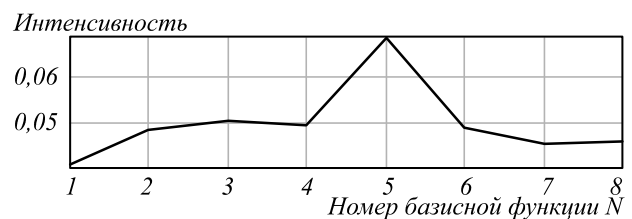


Рис. 5. Распределение интенсивности в центрах дифракционных порядков для рис. 4

Если фильтр (9) настроить на более высокий уровень aberrаций, в частности, согласовать с $\alpha_0 = 0,5\lambda$, то картина в фокальной плоскости существенно изменится (рис. 6). Видно наличие выраженного корреляционного пика в соответствующем дифракционном порядке. Кроме того, верное детектирование подтверждает распределение интенсивности среди центров дифракционных порядков (рис. 7). Причём теперь максимум для $N=5$ значительно превышает остальные значения.

Если уровень aberrаций в фильтре ещё увеличить до $\alpha_0 = \lambda$, то корреляционный пик снова исчезнет (рис. 8), но максимум по-прежнему имеет место в соответствующем дифракционном порядке (рис. 9), хотя уже не такой выраженный.

Таким образом, при наличии в волновом фронте одной выраженной aberrации можно не только её детектировать, но и определить её уровень на основе итерационного подбора весов в оптическом фильтре.

Критериями верного детектирования aberrации волнового фронта являются два фактора: наличие

корреляционного пика в одном из дифракционных порядков фильтра и наибольшее значение интенсивности в центре этого дифракционного порядка по сравнению с центрами других порядков.

Такой подход не приводит к появлению ложных пиков даже при высоких уровнях aberrаций, в отличие от оптического разложения непосредственно по функциям Цернике [29, 30]. В табл. 2 показаны результаты уверенного детектирования различных aberrаций, согласованных с функциями Цернике, величиной $\alpha = \lambda$.

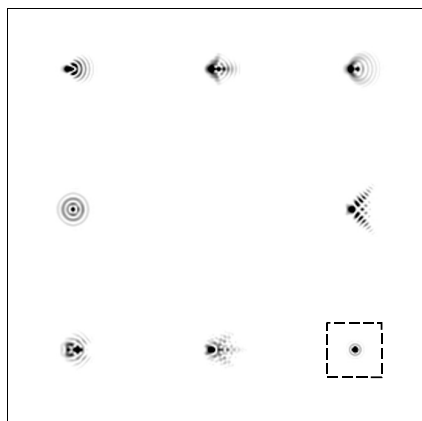


Рис. 6. Действие фильтра (9) с $\alpha_0 = 0,5\lambda$ при анализе aberrации $N = 5$ с $\alpha = 0,5\lambda$

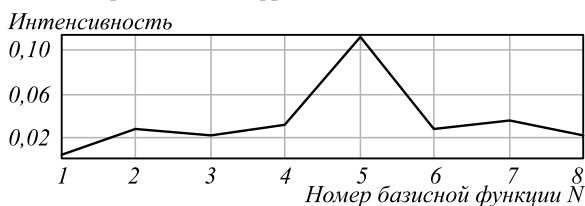


Рис. 7. Распределение интенсивности в центрах дифракционных порядков для рис. 6

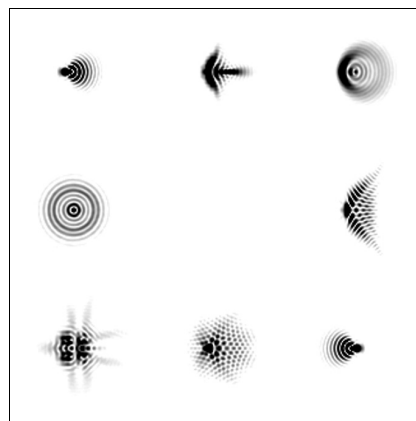


Рис. 8. Действие фильтра (9) с $\alpha_0 = \lambda$ при анализе aberrации $N = 5$ с $\alpha = 0,5\lambda$

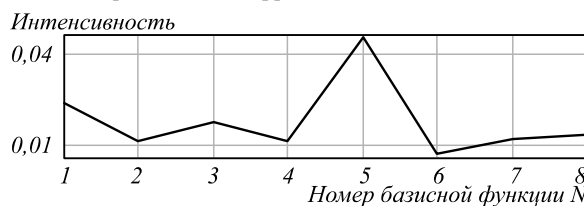


Рис. 9. Распределение интенсивности в центрах дифракционных порядков для рис. 8

Табл. 2. Действие фильтра (9) с $\alpha_0 = \lambda$ при анализе различных отдельных aberrаций N с $\alpha = \lambda$

N	2	3	4	6	7
Фаза анализируемого волнового фронта					
Действие фильтра (амплитуда в фокальной плоскости)					

2.2. Согласование фильтра с уровнем aberrации

Если нужно определить не только тип aberrации, но и более точно её уровень, то фильтр можно настроить лишь на один тип aberrации N_0 с различными уровнями α_k :

$$\tau(x, y) = \sum_{k=1}^{K_{\max}} \exp[-i2\pi\alpha_k Z_{N_0}(x, y)] \times \exp[i(a_k x + b_k y)]. \tag{10}$$

Для анализа других типов aberrаций фильтр можно быстро перестроить, с учётом использования динамического транспаранта.

На рис. 10 показано действие 25-канального фильтра (10) для $N_0=5$ с различными α_k в диапазоне от $0,05\lambda$ до $1,25\lambda$ с шагом $0,05\lambda$ при освещении плоской волной. А в табл. 3 показано действие фильтра (10), согласованного с различными функциями N_0 при анализе волнового фронта с заданной aberrацией $N=5$ при $\alpha=0,5\lambda$.

Из табл. 3 видно, что минимальный радиус рассеяния при максимальном значении интенсивности регистрируется фильтром с параметром $N_0=5$, что соответствует анализируемому полю. Рассмотрим более подробно распределение в фокальной плоскости

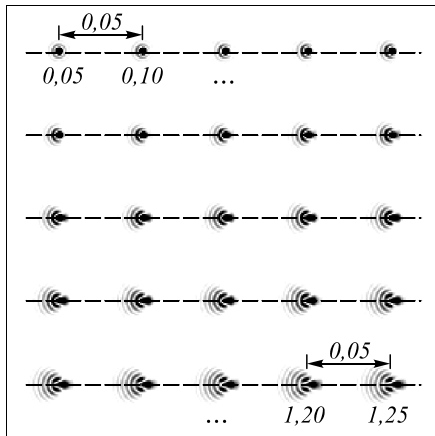


Рис. 10. Схема соответствия значения уровня α_k (в диапазоне от $0,05\lambda$ до $1,25\lambda$ с шагом $0,05\lambda$) дифракционным порядкам фильтра (10) для $N_0=5$

фильтра и определим критерии обнаружения волновой aberrации фильтром.

На рис. 11 представлено более детально действие фильтра (10), согласованного с $N_0=5$ при анализе волнового фронта с $N=5$.

Из рис. 11 видно, что корреляционный пик (пунктирная рамка) регистрируется в дифракционном порядке для уровня $\alpha_k=0,5\lambda$ (в соответствии со схемой, показанной на рис. 10). Максимум интенсивности (сплошная рамка) наблюдается в соседнем дифракционном порядке ($\alpha_k=0,45\lambda$). Точкой симметрии, относительно которой происходит изменение ориентации (поворот) картины ФРТ, также является $\alpha_k=0,5\lambda$ (это хорошо видно на рис. 12).

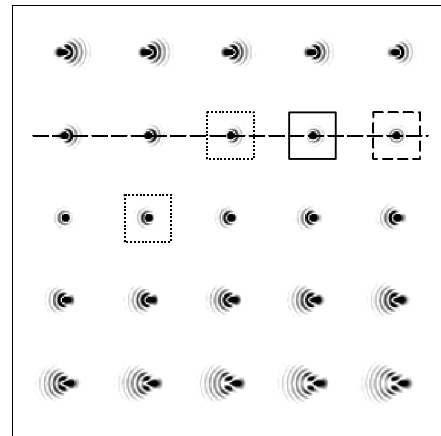


Рис. 11. Действие фильтра (10), согласованного с $N_0=5$ при анализе волнового фронта с $N=5$ при $\alpha=0,5\lambda$.

Табл. 3. Действие фильтра (10), согласованного с различными функциями N_0 при анализе волнового фронта с aberrацией $N=5$ при $\alpha=0,5\lambda$

N_0	1	2	3	4
Амплитуда				
N_0	5	6	7	8
Амплитуда				

На графиках рис. 12 хорошо видно, что картины ФРТ в дифракционных порядках изменяют свою ориентацию при переходе через $\alpha_k=0,5\lambda$. Именно этот уровень имеет анализируемое поле.

Таким образом, можно вести следующие эмпирические критерии:

1. Формирование выраженного **корреляционного пика** в фокальной плоскости фильтра в области дифракционного порядка p :

$$\min_p \{MSE[F_p(x, y), D(x, y)]\} < MSE_0, \quad (11)$$

где $D(x, y)$ – картина Эйри (ФРТ для круглой апертуры, соответствующая функции Бесселя 1-го порядка, делённой на аргумент).

2. **Индикатор поворота** ФРТ анализируемого ВФ в фокальной плоскости фильтра в области дифракционного порядка p относительно ФРТ анализируемого ВФ в фокальной плоскости фильтра в области дифракционного порядка q (для нечётных aberrаций):

$$ROT[F_p, F_q] = 1 \ \& \ 1 \leq |p - q| \leq 2. \quad (12)$$

3. **Минимальное среднее квадратичное отклонение** ФРТ анализируемого ВФ в фокальной плоскости фильтра в области дифракционного порядка p от ФРТ анализируемого ВФ в фокальной плоскости фильтра в области дифракционного порядка q (для чётных aberrаций):

$$\min_{pq} \{MSE[F_p, F_q]\} < MSE_0 \ \& \ 1 \leq |p - q| \leq 2. \quad (13)$$

4. **Максимальная интенсивность** в области дифракционного порядка p размера $S \times S$:

$$\max_{ij} \{ |F_p(x_i, y_j)|^2 \}. \quad (14)$$

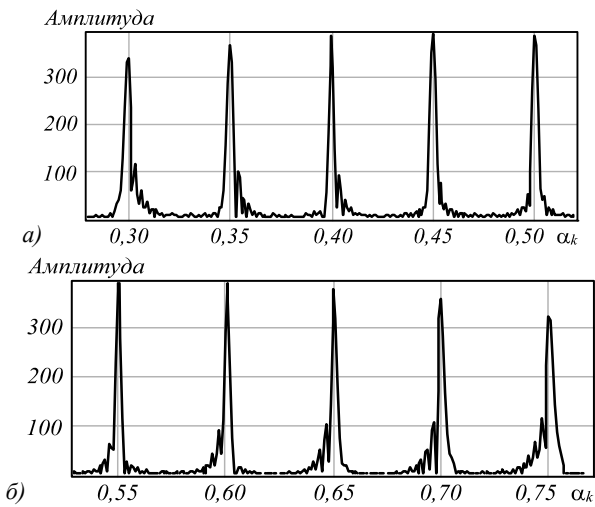


Рис. 12. Горизонтальное сечение (амплитуда) для строки 2 (а) и для строки 3 (б) рис. 11

Среднее квадратичное отклонение ФРТ $F_p(x, y)$ в области дифракционного порядка p размера $S \times S$ от ФРТ $F_q(x, y)$ в области дифракционного порядка q размера $S \times S$ определяется следующим образом:

$$MSE[F_p(x, y), F_q(x, y)] = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S (F_p(x_i, y_j) - F_q(x_i, y_j))^2. \quad (15)$$

Индикатор поворота основан на оценке среднего квадратичного отклонения искомой ФРТ $F_p(x, y)$ от ФРТ $F_q(x, y)$, умноженной на матрицу поворота:

$$F_q^{ROT}(x, y) = F_q(x', y'), \quad (16)$$

где $x' = x \cos(\theta) \pm y \sin(\theta)$, $y' = \pm x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$, θ – угол поворота.

Если $MSE[F_p(x, y), F_q^{ROT}(x, y)] < MSE_0$ и угол поворота θ равен 90 или 180 градусов, то индикатор поворота ФРТ $ROT[F_p(x, y), F_q(x, y)] = 1$, иначе равен 0, MSE_0 – задано на уровне 0,05.

На основе анализа распределения интенсивности в фокальной плоскости с учётом предложенных критериев можно определить диапазон, в котором лежит уровень анализируемой aberrации. Причём точность этого диапазона напрямую зависит от уровня зашумления регистрирующего прибора. При помощи динамически перестраиваемого ДОО, реализованного на пространственном модуляторе света, появляется возможность уточнить уровень анализируемого ВФ либо взять среднее из уже детектированного диапазона.

2.3. Согласование фильтра с типом и уровнем aberrации

Рассчитаем 25-канальный фильтр с общей функцией пропускания (8), у которого по строкам изменяется диапазон α_k от 0,1 до 1,0, а по столбцам – тип волновой aberrации (схема соответствия показана на рис. 13).

На рис. 14 показано действие фильтра с функцией пропускания (8) при анализе волнового фронта с заданной aberrацией $N=5$ при $\alpha = 0,5\lambda$. Хорошо видно, что максимальное амплитудное значение зарегистрировано в дифракционном порядке с закодированной волновой aberrацией Z_5 уровня $0,5\lambda$, причём экстремум соответствует корреляционному пику. Кроме того, из рис. 14 видно, что изменение ориентации дифракционного порядка (поворот) происходит при переходе именно через этот дифракционный порядок (более наглядно это показано на рис. 15).

Таким образом, данный дифракционный порядок удовлетворяет нескольким введённым выше критериям. В табл. 4 показаны аналогичные результаты моделирования для других типов aberrаций.

Заключение

В данной работе проведено численное исследование многоканального датчика волнового фронта, согласованного с фазовыми распределениями в виде функций Цернике.

Рассчитано несколько вариантов фильтров, согласованных с различными типами aberrаций одного уровня, с одним типом aberrаций разного уровня, и гибридный фильтр. Каждый из вариантов удобен для конкретной задачи. Гибридный фильтр имеет смысл применять для предварительного анализа, а фильтр, согласованный с различными уровнями, – для уточнения. При использовании динамического транспаранта возможна оперативная перестройка фильтров и пошаговая компенсация aberrации.

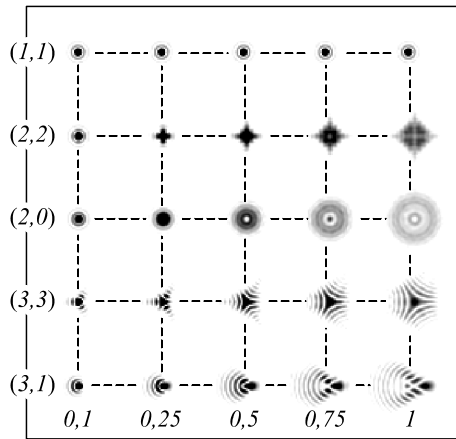


Рис. 13. Схема соответствия индексов и уровней дифракционным порядкам фильтра (8)

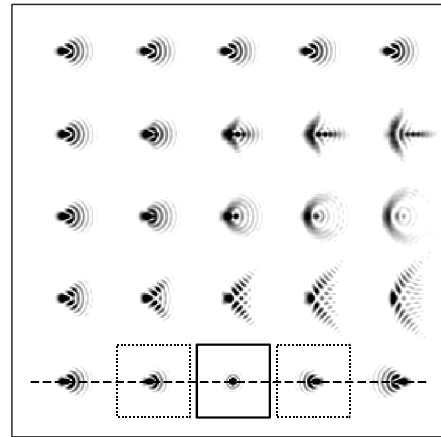


Рис. 14. Действие фильтра с функцией пропускания (8) для некоторых Z_N при анализе заданного искажённого волнового фронта. Обозначения: сплошная линия – максимум интенсивности и корреляционный пик, пунктирная – изменение ориентации (поворот)

Табл. 4. Действие фильтра (8) при анализе различных отдельных aberrаций N с $\alpha = \lambda$

N	2	3	4
Фаза анализируемого волнового фронта			
Действие фильтра (амплитуда в фокальной плоскости)			

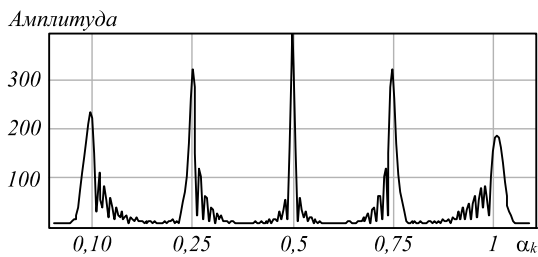


Рис. 15. Горизонтальное сечение (амплитуда) строки 5 рис. 14

Выполнена поэтапная компенсация aberrаций волнового фронта с применением предложенных методов и критериев на численных тестовых примерах.

Сформулированы критерии для определения aberrации анализируемого волнового фронта на основе области рассеяния (компактности), максимальной

интенсивности и ориентации каждого дифракционного порядка в фокальной плоскости фильтра. На основе численного моделирования показана работоспособность предложенной модели для детектирования aberrаций волнового фронта в широком диапазоне (от $0,1\lambda$ до λ).

Учитывая широкий диапазон корректно детектируемой величины aberrаций при помощи предложенного метода, областью применения может выступать измерение и коррекция aberrаций волнового фронта в таких устройствах, как наземные телескопы и оптические микроскопы, в системах оптической коммуникации, в промышленной лазерной технике, а также в офтальмологии.

В дальнейшем авторы работы планируют разработать и исследовать итерационный алгоритм коррек-

ции сложного волнового фронта, описываемого суперпозицией полиномов Цернике. Учитывая, что в этом случае классический подход, базирующийся на формировании корреляционного пика, не актуален – будут расширены критерии определения aberrаций и предложен итерационный алгоритм с поэтапной компенсацией волнового фронта на основе введённых критериев.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-37-90129) в части численного моделирования, а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в теоретической части.

Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера К-100, установленного в Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Литература

1. **Camacho, L.** Quantitative phase microscopy using defocusing by means of a spatial light modulator / L. Camacho, V. Mico, Z. Zalevsky, J. Garcia // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 6755-6766.
2. **Lombardo, M.** Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance / M. Lombardo, G. Lombardo // *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. – 2010. – Vol. 36. – P. 313-320.
3. **Zhao, Q.** Effect of optical aberration of telescopes to the laser radar / Q. Zhao, H. Fan, S. Hu, M. Zhong, L. Baida // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – Vol. 7656. – 76565Z.
4. **González-Núñez, H.** Pupil aberrations in Offner spectrometers / H. González-Núñez, X. Prieto-Blanco, R. De la Fuente // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 29. – P. 442-449.
5. **Khonina, S.N.** Analysis of wave aberration influence on reducing focal spot size in a high-aperture focusing system / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, E.A. Pelevina // *Journal of Optics*. – 2011. – Vol. 13, Issue 9. – 095702. – DOI: 10.1088/2040-8978/13/9/095702.
6. **Booth, M.** Aberrations and adaptive optics in super-resolution microscopy / M. Booth, D. Andrade, D. Burke, B. Patton, M. Zurauskas // *Microscopy*. – 2015. – Vol. 64. – P. 251-261.
7. **Khonina, S.N.** Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, D.V. Kirsh // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 146-153. – DOI: 10.18287/jbpe-2015-1-2-146.
8. **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. – DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817.
9. **Wilby, M.J.** Designing and testing the coronagraphic modal wavefront sensor: A fast non-common path error sensor for high-contrast imaging / M.J. Wilby, C.U. Keller, S. Haert, V. Korkiakoski, F. Snik, A.G.M. Pietrow // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9909. – 990921.
10. **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. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36.
11. **Расторгуев, А.А.** Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 424-431. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.
12. **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.
13. **Martins, A.C.** Measuring ocular aberrations sequentially using a digital micromirror device / A.C. Martins, B. Vohnsen // *Micromachines*. – 2019. – Vol. 10. – 117.
14. **Baum, O.I.** Control of laser-beam spatial distribution for correcting the shape and refraction of eye cornea / O.I. Baum, A.I. Omel'chenko, E.M. Kasianenko, R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy, E.N. Sobol', A.V. Bolshunov, S.E. Avetisov, V.Ya. Panchenko // *Quantum Electronics*. – 2020. – Vol. 50, Issue 1. – P. 87-93. – DOI: 10.1070/QEL17216.
15. **Mu, Q.** Adaptive optics imaging system based on a high-resolution liquid crystal on silicon device / Q. Mu, Z. Cao, L. Hu, D. Li, L. Xuan // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14. – P. 8013-8018.
16. **Ellerbroek, B.L.** Inverse problems in astronomical adaptive optics / B.L. Ellerbroek, C.R. Vogel // *Inverse Problems*. – 2009. – Vol. 25. – 063001.
17. **Esposito, S.** Large binocular telescope adaptive optics system: new achievements and perspectives in adaptive optics / S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, A. Puglisi, F. Quirós-Pacheco, C. Arcidiacono, M. Xompero, R. Briguglio, G. Agapito, L. Busoni, L. Fini, J. Argomedo, A. Gherardi, G. Brusa, D. Miller, J.C. Guerra, P. Stefanini, P. Salinari // *Proceedings of SPIE*. – 2011. – Vol. 8149. – 814902.
18. **Lukin, V.P.** Adaptive optics in the formation of optical beams and images / V.P. Lukin // *Physics-Uspekhi*. – 2014. – Vol. 57, Issue 6. – P. 556-592.
19. **Ji, N.** Adaptive optical fluorescence microscopy / N. Ji // *Nature Methods*. – 2017. – Vol. 14. – P. 374-380.
20. **Bond, C.Z.** Adaptive optics with an infrared pyramid wavefront sensor / P. Wizinowich, M. Chun, D. Mawet, S. Lilley, S. Cetre, N. Jovanovic, J.-R. Delorme, E. Wetherell, S. Jacobson, C. Lockhart, E. Warmbier, J.K. Wallace, D.N. Hall, S. Goebel, O. Guyon, C. Plantet, G. Agapito, C. Giordano, S. Esposito, B. Femenia-Castella // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 10703. – 107031Z.
21. **Mahajan, V.N.** Zernike circle polynomials and optical aberration of system with circular pupils / V.N. Mahajan // *Applied Optics*. – 1994. – Vol. 33, Issue 34. – P. 8121-8124.
22. **Love, G.D.** Wavefront correction and production of Zernike modes with a Liquid crystal spatial light modulator / G.D. Love // *Applied Optics*. – 1997. – Vol. 36. – P. 1517-1525.
23. **Khonina, S.N.** Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, Y. Wang, D. Zhao // *Proceedings of SPIE*. – 1998. – Vol. 3573. – P. 550-553. – DOI: 10.1117/12.324588.
24. **Neil, M.A.A.** New modal wave-front sensor: a theoretical analysis / M.A.A. Neil, M.J. Booth, T. Wilson // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2000. – Vol. 17. – P. 1098-1107.

25. **Booth, M.J.** Direct measurement of Zernike aberration modes with a modal wavefront sensor / M.J. Booth // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5162. – P. 79-90.
26. **Sheppard, C.J.R.** Zernike expansion of pupil filters: optimization of the signal concentration factor / C.J.R. Sheppard // Journal of the Optical Society of America A. – 2015. – Vol. 32, Issue 5. – P. 928-933.
27. **Porfirev, A.P.** Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
28. **Wilby, M.J.** The coronagraphic Modal Wavefront Sensor: a hybrid focal-plane sensor for the high-contrast imaging of circumstellar environments / M.J. Wilby, C.U. Keller, F. Snik, V. Korkiakoski, A.G.M. Pietrow // Astronomy & Astrophysics. – 2017. – Vol. 597. – A112.
29. **Degtyarev, S.A.** Zernike basis-matched multi-order diffractive optical elements for wavefront weak aberrations analysis / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10337. – 103370Q. – DOI: 10.1117/12.2269218.
30. **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, Issue 14. – 3850. – DOI: 10.3390/s20143850.
31. **Gerchberg, R.** Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope / R. Gerchberg, W. Saxton // Optik. – 1971. – Vol. 34. – P. 275-284.
32. **Fienup, J.R.** Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform / J.R. Fienup // Optics Letters. – 1978. – Vol. 3, Issue 1. – P. 27-29.
33. **Elser, V.** Phase retrieval by iterated projections / V. Elser // Journal of the Optical Society of America A. – 2003. – Vol. 20, Issue 1. – P. 40-55.
34. **Marchesini, S.** A unified evaluation of iterative projection algorithms for phase retrieval / S. Marchesini // Review of Scientific Instruments. – 2007. – Vol. 78, Issue 1. – 011301.
35. **Zhang, C.** Two-step phase retrieval algorithm using single-intensity measurement / C. Zhang, M. Wang, Q. Chen, D. Wang, S. Wei // International Journal of Optics. – 2018. – Vol. 2018. – 8643819.
36. **Tokovinin, A.** DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2006. – Vol. 118, Issue 846. – P. 1165-1175.
37. **Guo, H.** Wavefront reconstruction with artificial neural networks / H. Guo, N. Korablinova, Q. Ren, J. Bille // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 14. – P. 6456-6462.
38. **Paine, S.W.** Machine learning for improved image-based wavefront sensing / S.W. Paine, J.R. Fienup // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, Issue 6. – P. 1235-1238.
39. **Rivenson, Y.** Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks / Y. Rivenson, Y. Zhang, H. Günaydin, D. Teng, A. Ozcan // Light: Science & Applications. – 2018. – Vol. 7, Issue 2. – 17141.
40. **Dzyuba, A.P.** Optical phase retrieval with the image of intensity in the focal plane based on the convolutional neural networks / A.P. Dzyuba // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368, Issue 2. – 022055.
41. **Nishizaki, Y.** Deep learning wavefront sensing / Y. Nishizaki, M. Valdivia, R. Horisaki, K. Kitaguchi, M. Saito, J. Tanida, E. Vera // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 1. – P. 240-251.
42. **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. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-810.

Сведения об авторах

Хорин Павел Алексеевич, аспирант кафедры технической кибернетики факультета информатики Самарского университета; программист научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований (НИИ-35). Область научных интересов: математическое моделирование, дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: paul.95.de@gmail.com.

Вологовский Сергей Геннадьевич, научный сотрудник, ведущий программист ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: разработка программного обеспечения расчёта и моделирование работы элементов дифракционной оптики. E-mail: sv@ipsiras.ru.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 9 апреля 2021 г. Окончательный вариант – 2 мая 2021 г.

Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions

P.A. Khorin¹, S.G. Volotovskiy², S.N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

Abstract

The use of a multichannel wavefront sensor matched with phase Zernike functions to determine the type and magnitude of aberration in the analyzed wavefront is investigated. The approach is based on stepwise compensation of wavefront aberrations based on a dynamically tunable spatial light modulator. As criteria for successful detection, not only the magnitude of the correlation peak, but also the maximum intensity, compactness, and orientation of the distribution in each diffraction order are considered. On the basis of numerical simulation, the efficiency of the proposed approach is shown for detecting both weak and strong (up to a wavelength) wavefront aberrations.

Keywords: wavefront aberrations, Zernike functions, wavefront sensor, multichannel diffractive optical element.

Citation: Khorin PA, Volotovskiy SG, Khonina SN. Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions. *Computer Optics* 2021; 45(4): 525-533. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-906.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 20-37-90129 (numerical modeling) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under a government project of the Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, 007-GZ/Ch3363/26 (theoretical research).

The calculations were carried out using a hybrid supercomputer K-100, installed in the Center for Collective Use of the Institute of Applied Mathematics. M.V. Keldysh RAS

References

- [1] Camacho L, Mico V, Zalevsky Z, Garcia J. Quantitative phase microscopy using defocusing by means of a spatial light modulator. *Opt Express* 2010; 18: 6755-6766.
- [2] Lombardo M, Lombardo G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. *J Cataract Refract Surg* 2010; 36(2): 313-320. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.09.026.
- [3] Zhao Q, Fan H, Hu S, Zhong M, Baida L. Effect of optical aberration of telescopes to the laser radar. *Proc SPIE* 2010; 7656: 76565Z. DOI: 10.1117/12.867716.
- [4] González-Núñez H, Prieto-Blanco X, De la Fuente R. Pupil aberrations in Offner spectrometers. *J Opt Soc Am A* 2011; 29: 442-449.
- [5] Khonina SN, Ustinov AV, Pelevina E.A. Analysis of wave aberration influence on reducing focal spot size in a high-aperture focusing system. *J Opt* 2011; 13: 095702. DOI: 10.1088/2040-8978/13/9/095702.
- [6] Booth M, Andrade D, Burke D, Patton B, Zuraszkas M. Aberrations and adaptive optics in super-resolution microscopy. *Microscopy* 2015; 64(4): 251-261.
- [7] Khonina SN, Kotlyar VV, Kirsh DV. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye. *J-BPE* 2015; 1(2): 146-153. DOI: 10.18287/jbpe-2015-1-2-146.
- [8] Khorin PA, Khonina SN, Karsakov AV, Branchevskiy SL. Analysis of corneal aberration of the human eye. *Computer Optics* 2016; 40(6): 810-817. DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817.
- [9] Wilby MJ, Keller CU, Haert S, Korkiakoski V, Snik F, Pietrow AGM. Designing and testing the coronagraphic modal wavefront sensor: A fast non-common path error sensor for high-contrast imaging. *Proc SPIE* 2016; 9909: 990921.
- [10] Klebanov IM, Karsakov AV, Khonina SN, Davydov AN, Polyakov KA. Wavefront aberration compensation of space telescopes with telescope temperature field adjustment. *Computer Optics* 2017; 41(1): 30-36. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36.
- [11] Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling of arrangement tolerances for the optical elements in a spaceborne Offner imaging hyperspectrometer. *Computer Optics* 2018; 42(3): 424-431. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.
- [12] Abramenko AA. Extrinsic calibration of stereo camera and three-dimensional laser scanner. *Computer Optics* 2019; 43(2): 220-230. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-220-230.
- [13] Martins AC, Vohnsen B. Measuring Ocular Aberrations Sequentially Using a Digital Micromirror Device. *Micromachines* 2019; 10: 117.
- [14] Baum OI, Omel'chenko AI, Kasianenko EM, Skidanov RV, Kazanskiy NL, Sobol' EN, Bolshunov AV, Avetisov SE, Panchenko VYa. Control of laser-beam spatial distribution for correcting the shape and refraction of eye cornea. *Quantum Electronics* 2020; 50(1): 87-93. DOI: 10.1070/QEL17216.
- [15] Mu Q, Cao Z, Hu L, Li D, Xuan L. Adaptive optics imaging system based on a high-resolution liquid crystal on silicon device. *Opt Express* 2006; 14: 8013-8018.
- [16] Ellerbroek BL, Vogel CR. Inverse problems in astronomical adaptive optics. *Inverse Probl* 2009; 25(6): 063001.
- [17] Esposito S, Riccardi A, Pinna E, Puglisi A, Quirós-Pacheco F, Arcidiacono C, Xompero M, Briguglio R, Agapito G, Busoni L, Fini L, Argomedo J, Gherardi A, Brusa G, Miller D, Guerra JC, Stefanini P, Salinari P.

- Large Binocular Telescope Adaptive Optics System: new achievements and perspectives in adaptive optics. Proc SPIE 2011; 8149: 814902.
- [18] Luki VP. Adaptive optics in the formation of optical beams and images. Phys Usp 2014; 57: 556-592. DOI: 10.3367/UFNe.0184.201406b.0599.
- [19] Ji N. Adaptive optical fluorescence microscopy. Nat Methods 2017; 14: 374-380.
- [20] Bond CZ, Wizinowich P, Chun M, Mawet D, Lilley S, Centre S, Jovanovic N, Delorme J-R, Wetherell E, Jacobson S, Lockhart C, Warmbier E, Wallace JK, Hall DN, Goebel S, Guyon O, Plantet C, Agapito G, Giordano C, Esposito S, Femenia-Castella B. Adaptive optics with an infrared pyramid wavefront sensor. Proc SPIE 2018; 10703: 107031Z.
- [21] Mahajan VN. Zernike circle polynomials and optical aberration of system with circular pupils. Supp Appl Opt 1994; 33: 8121-8124.
- [22] Love GD. Wavefront correction and production of Zernike modes with a Liquid crystal spatial light modulator. Appl Opt 1997; 36: 1517-1525.
- [23] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Wang Y, Zhao D. Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter. Proc SPIE 1998; 3573: 550-553. DOI: 10.1117/12.324588.
- [24] Neil MAA, Booth MJ, Wilson T. New modal wavefront sensor: a theoretical analysis. J Opt Soc Am A 2000; 17: 1098-1107.
- [25] Booth MJ. Direct measurement of Zernike aberration modes with a modal wavefront sensor. Proc SPIE 2003; 5162: 79-90.
- [26] Sheppard CJR. Zernike expansion of pupil filters: optimization of the signal concentration factor. J Opt Soc Am A 2015; 32(5): 928-933. DOI: 10.1364/JOSAA.32.000928.
- [27] Porfirev AP, Khonina SN. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions. Proc SPIE 2016; 9807: 98070E. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [28] Wilby MJ, Keller CU, Snik F, Korciakoski V, Pietrow AGM. The coronagraphic Modal Wavefront Sensor: a hybrid focal-plane sensor for the high-contrast imaging of circumstellar environments. A&A 2017; 597: A112.
- [29] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Zernike basis-matched multi-order diffractive optical elements for wavefront weak aberrations analysis. Proc SPIE 2017; 10337: 103370Q. DOI: 10.1117/12.2269218.
- [30] Khonina SN, Karpeev SV, Porfirev AP. Wavefront aberration sensor based on a multichannel diffractive optical element. Sensors 2020; 20: 3850. DOI: 10.3390/s20143850.
- [31] Gerchberg R, Saxton W. Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope. Optik 1971; 34: 275-284.
- [32] Fienup JR. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. Opt Lett 1978; 3(1): 27-29.
- [33] Elser V. Phase retrieval by iterated projections. J Opt Soc Am A 2003; 20(1): 40-55. DOI: 10.1364/JOSAA.20.000040.
- [34] Marchesini S. A unified evaluation of iterative projection algorithms for phase retrieval. Rev Sci Instrum 2007; 78(1): 011301. DOI: 10.1063/1.2403783.
- [35] Zhang C, Wang M, Chen Q, Wang D, Wei S. Two-step phase retrieval algorithm using single-intensity measurement. Int J Op; 2018: 8643819. DOI:10.1155/2018/8643819.
- [36] Tokovinin A, Heathcote S. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 2006; 118(846): 1165-1175. DOI: 10.1086/506972.
- [37] Guo H, Korablinova N, Ren Q, Bille J. Wavefront reconstruction with artificial neural networks. Opt Express 2006; 14(14): 6456-6462. DOI: 10.1364/OE.14.006456.
- [38] Paine SW, Fienup JR. Machine learning for improved image-based wavefront sensing. Opt Lett 2018; 43(6): 1235-1238. DOI: 10.1364/OL.43.001235.
- [39] Rivenson Y, Zhang Y, Günaydin H, Teng D, Ozcan A. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks. Light Sci Appl 2018; 7(2): 17141. DOI: 10.1038/lsa.2017.141.
- [40] Dzyuba AP. Optical phase retrieval with the image of intensity in the focal plane based on the convolutional neural networks. J Phys Conf Ser 2019; 1368(2): 022055. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022055.
- [41] Nishizaki Y, Valdivia M, Horisaki R, Kitaguchi K, Saito M, Tanida J, Vera E. Deep learning wavefront sensing. Opt Express 2019; 27(1): 240-251. DOI: 10.1364/OE.27.000240.
- [42] Rodin IA, Khonina SN, Serafimovich PG, Popov SB. Recognition of wavefront aberrations types corresponding to single Zernike functions from the pattern of the point spread function in the focal plane using neural networks. Computer Optics 2020; 44(6): 923-930. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-810.

Authors' information

Pavel Alekseevich Khorin, post-graduate student in the Technical Cybernetics department of Samara University Informatics faculty; programmer in the research laboratory of automated systems for scientific research «NIL-35». Research interests: mathematical modeling, diffractive optics, optical and digital image processing.

E-mail: paul.95.de@gmail.com.

Sergey Gennadjevich Volotovskiy, researcher in the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: software design, modeling of systems with diffractive optical elements.

E-mail: sv@ipsiras.ru.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

Received April 9, 2021. The final version – May 2, 2021.