

# Анализ возможности повышения разрешения на основе аподизации для частично-когерентных оптических систем в присутствии aberrаций

Я.Р. Скиданов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Степень когерентности излучения является важной характеристикой, от которой зависят интерференционные свойства световых полей и, как следствие, разрешение оптических систем. При распространении на большие расстояния даже в свободном пространстве изначально полностью когерентное или некогерентное излучение становится частично-когерентным. Это обстоятельство необходимо учитывать при формировании оптических изображений наряду с учетом влияния aberrаций волнового фронта. В данной работе исследуется изменение разрешающей способности системы для двух близкорасположенных точечных источников света в зависимости от степени пространственной когерентности в присутствии различных aberrаций. Также исследуется возможность улучшения разрешающей способности в рассмотренных ситуациях на основе амплитудной аподизации оптической системы.

## 1. Введение

Часто для решения многих задач интерферометрии, голографии и некоторых видов оптических датчиков (например, волоконно-оптических) необходим свет с очень высокой пространственной и временной когерентностью [1-7]. Для других задач когерентность используемого света должна быть максимально низкой, насколько возможно. Например, очень низкая временная когерентность (но в сочетании с высокой пространственной когерентностью) требуется для когерентной томографии [8-10]. Однако даже полностью когерентное или некогерентное излучение становится частично когерентным при рассеянии [11] и даже при распространении в свободном пространстве на значительные расстояния [12]. Состояние когерентности существенно влияет на качество формирования оптических изображений [13], что необходимо учитывать наряду с влиянием aberrаций волнового фронта [14-18], основными причинами возникновения которых являются: турбулентность атмосферы, неидеальность форм оптических элементов системы, погрешности при юстировке системы и др. [19-26].

Одним из способов улучшения разрешения является амплитудная и/или фазовая аподизация оптической системы [27-37]. Однако, аподизация, как правило, позволяет не только уменьшить размер светового пятна, но и приводит к появлению боковых лепестков [38-41], которые ухудшают изображающие свойства. Для компенсации этого негативного фактора используют сложные функции аподизации, в частности, асимметричные [42-47].

В данной работе исследуется возможность повышения разрешающей способности оптической системы для двух близкорасположенных точечных источников света на основе амплитудной аподизации в зависимости от степени пространственной когерентности в присутствии различных aberrаций.

## 2. Теория

Общепринятым представлением волнового фронта является базис полиномов Цернике, которые также используются для детектирования отклонения от идеального фронта и типов aberrаций, присутствующих в искажении [48-53]. Для визуальной оценки качества изображения используют функцию рассеяния точки (ФРТ). Ранее, в работе [54] была описана методика моделирования формирования ФРТ для двух источников света в когерентном случае в присутствии aberrаций, а также аподизирующей функции.

В данной работе дополнительно рассматривается влияние степени когерентности двух источников, которая задается следующей формулой:

$$I(r, \omega) = A_1^2(r, \omega) + A_2^2(r, \omega) + 2\mu|A_1(r, \omega)||A_2(r, \omega)|\cos(\varphi_1(r, \omega) - \varphi_2(r, \omega)), \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент когерентности источников света,  $A_1, A_2$  – соответствующие амплитуды  $\varphi_1, \varphi_2$  – соответствующие фазы.

Чтобы построить изображение исходного объекта  $a(\mathbf{x})$  в когерентном случае ( $\mu=1$ ) можно использовать следующее выражение [55, 56]:

$$b(\mathbf{x}) = \int S_a(\mathbf{u})P(\mathbf{u})\exp\left(\frac{i\mathbf{k}\mathbf{x}\mathbf{u}}{f}\right)d\mathbf{u}, \quad (2)$$

где  $S_a(\mathbf{u})$  – пространственный спектр исходного объекта,  $P(\mathbf{u})$  – функция зрачка изображающей системы,  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $f$  – фокус изображающей системы.

Для изображающих оптических систем, в которых используется некогерентное ( $\mu=0$ ) излучение, рассматривается интенсивность изображения, которая определяется свёрткой интенсивности объекта и интенсивности импульсного отклика. Оптическая передаточная функция (ОПФ), представляющая собой пространственный спектр импульсного отклика системы, может быть также вычислена через функцию зрачка [57]:

$$W_p(\mathbf{u}) = \frac{\int P(\mathbf{s} - \mathbf{u}/2)P^*(\mathbf{s} + \mathbf{u}/2) d\mathbf{s}}{\int |P(\mathbf{s})|^2 d\mathbf{s}}. \quad (3)$$

Тогда интенсивность изображения определяется из выражений:

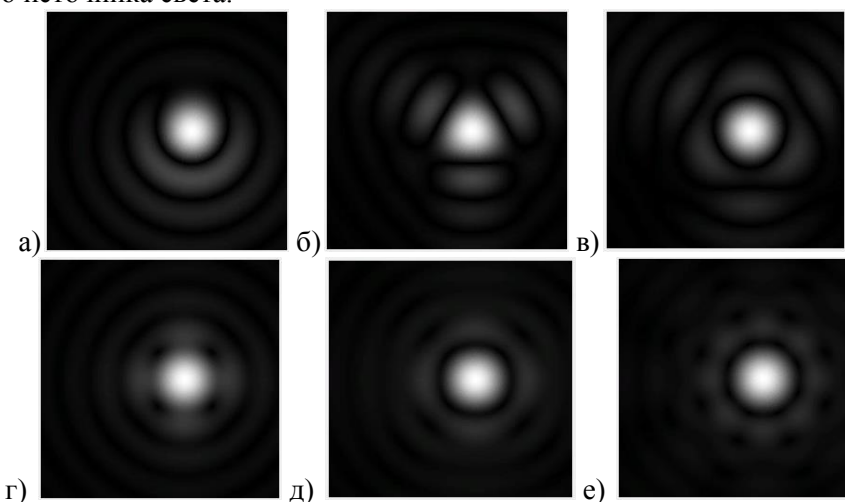
$$I_b(\mathbf{x}) = \int W_a(\mathbf{u})W_p(\mathbf{u})\exp\left(\frac{i\mathbf{k}\mathbf{x}\mathbf{u}}{f}\right)d\mathbf{u}, \quad (4)$$

$$W_a(\mathbf{u}) = \frac{k/f \int |a(\mathbf{x})|^2 \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{u}\mathbf{x}/f) d\mathbf{x}}{\int |a(\mathbf{x})|^2 d\mathbf{x}}. \quad (5)$$

## 3. Результаты моделирования

В данном разделе исследуется влияние различных aberrаций описываемых полиномами Цернике  $\Psi_n^m(\mathbf{u})$ , на ФРТ одного источника света и двух близко расположенных источников света. Под близкорасположенными источниками понимается два источника разделенных расстоянием по критерию Релея (максимум одного источника приходится на первый минимум второго). В этом случае, для идеальных ФРТ изображение точечных источников визуально плохо различимы (провал между ними порядка 20% от максимальной интенсивности). В данном разделе численно решается задача амплитудной аподизации зрачка оптической системы в присутствии aberrаций, с целью увеличить провал в изображениях двух близкорасположенных источников.

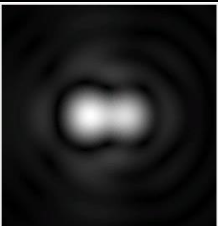
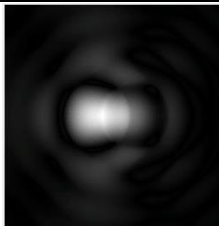
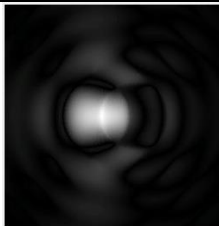
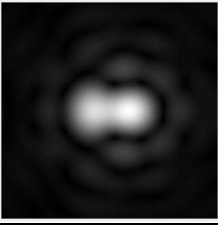
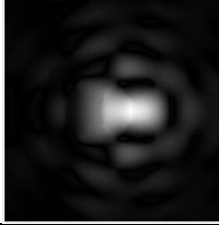
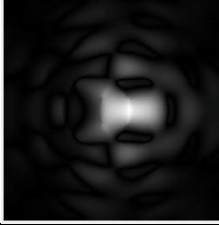
На рис. 1 показано влияние различных aberrаций, описываемых полиномами Цернике  $\Psi_n^m(\mathbf{u})$ , на ФРТ одного источника света.



**Рисунок 1.** ФРТ одного источника света в присутствии различных aberrаций: горизонтальная кома  $\Psi_1^3$  (а), горизонтальный трейfoil  $\Psi_3^3$  (б),  $\Psi_3^5$  (в), астигматизм  $\Psi_2^2$  (г), вторичный астигматизм  $\Psi_2^4$  (д), тетраfoil  $\Psi_4^4$  (е).

**Таблица 1.** ФРТ двух близкорасположенных точечных источников света для различной степени когерентности в присутствии различных aberrаций.

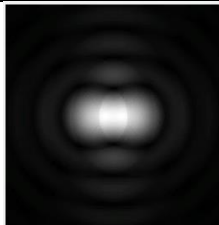
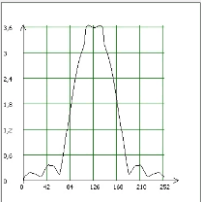
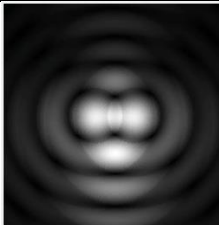
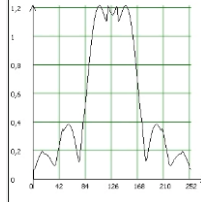
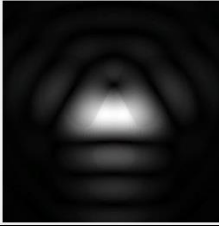
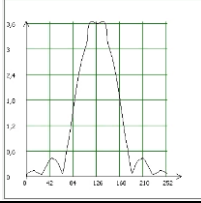
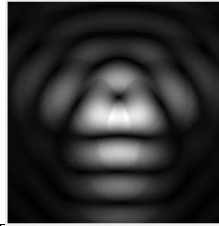
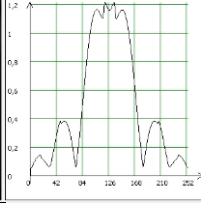
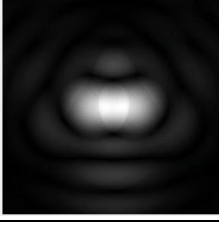
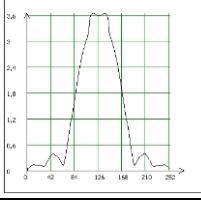
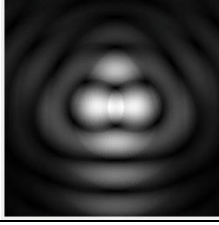
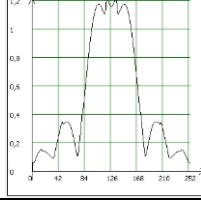
	$\mu=0$	$\mu=0,5$	$\mu=1$
Горизонтальная кома $\Psi_1^3$			
Горизонтальный трейfoil $\Psi_3^3$			
$\Psi_3^5$			
Астигматизм $\Psi_2^2$			

Вторичный астигматизм $\Psi_2^4$			
Тетрафойл $\Psi_4^4$			

Как можно видеть из таблицы 1 с повышением когерентности излучения точки становятся менее различимы, т.е. разрешение систем уменьшается. Также нужно заметить, что влияние aberrаций, описываемых полиномами Цернике с чётными индексами, является более негативным, чем для нечетных полиномов.

В таблице 2 показано влияние аподизации системы на ее разрешимость при условии частичной когерентности излучения ( $\mu=0,5$ ). Как видно, амплитудная аподизация немного улучшает ситуацию, но явного разрешения двух близкорасположенных точек не наблюдается. В дальнейших исследованиях планируется использовать более сложные функции аподизации.

**Таблица 2.** Влияние aberrации на разрешение частично-когерентной системы ( $\mu=0,5$ ).

	Без аподизации		С аподизацией	
Горизонтальная кома $\Psi_1^3$				
Горизонтальный трейфойл $\Psi_3^3$				
$\Psi_3^5$				

#### 4. Заключение

Проведенное исследование возможности повышения разрешения оптической системы на основе аподизации для частично когерентных систем показало, что с увеличением когерентности разрешение двух близкорасположенных источников света ухудшается. Применение амплитудной аподизации (в данной работе применялась аподизация  $f(r) = r^2$ ) не

привело к существенному улучшению разрешения в частично-когерентном случае. В дальнейших исследованиях планируется использовать более сложные функции аподизации, такие как  $f(x, y) = x^{\gamma} + y^{\gamma}$ . Также будет использована и фазовая аподизация.

## 5. Литература

- [1] Boivin, A. Energy flow in the neighborhood of the focus of a coherent beam / A. Boivin, J. Dow, E. Wolf // *Journal of the Optical Society of America*. – 1967. – Vol. 57. – P. 1171-1175.
- [2] Collett, E. Is complete spatial coherence necessary for the generation of highly directional light beams / E. Collett, E. Wolf // *Optics Letters*. – 1978. – Vol. 2. – P. 27-29.
- [3] Shan, T.J. Adaptive beamforming for coherent signals and interference / T.J. Shan, T. Kailath // *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. – 1985. – Vol. 33.
- [4] Basano, L. Complete destructive interference of partially coherent sources of acoustic waves / L. Basano, P. Ottonello // *Physical Review Letters*. – 2005 – Vol. 94. – P. 173-201.
- [5] Karpeev, S.V High-effective fiber sensors based on transversal mode selection / S.V Karpeev, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, N. L. Kazanskiy // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 58(54). – P. 163-169.
- [6] Gbur, G. Phase singularities and coherence vortices in linear optical systems / G. Gbur, T.D. Visser // *Optics Communications*. – 2006. – Vol. 259. – P. 428-435.
- [7] Davis, B.J. Computationally efficient coherent-mode representations / B.J. Davis, R.W. Schoonover // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34. – P. 923-925.
- [8] Fercher, A.F. Optical coherence tomography / A.F. Fercher, C.K. Hitzenberger // *Progress in Optics*. – 2002. – Vol. 44. – P. 215-301.
- [9] Baleine, E. Variable coherence tomography / A. Dogariu, E. Baleine // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29. – P. 1233-1235.
- [10] Brezinski, M. Optical coherence tomography: Principles and applications / M. Brezinski. – Burlington, MA: Academic Press, 2006.
- [11] Jansson, J. Spatial coherence discrimination in scattering / J. Jansson, T. Jansson, E. Wolf // *Optics Letters*. – 1988. – Vol. 13. – P. 1060-1062.
- [12] Devaney, A.J. Decrease in spatial coherence of light propagating in free space / A.J. Devaney, A.T. Friberg, A. Kumar, E. Wolf // *Optics Letters*. – 1997. – Vol. 22 – P. 1672-1673.
- [13] Friberg, A.T. Imaging of Gaussian Schell-model sources / A.T. Friberg, J. Turunen // *Journal of the Optical Society of America*. – 1988. – Vol. 5. – P. 713-720.
- [14] Zernike, F. Diffraction and optical image formation // *Proceedings of the Physical Society*. – 1948. – Vol. 61. – P. 158-164.
- [15] Welford, W.T. Aberrations of optical systems / W.T. Welford. – Adam Hilger Press (Bristol and Philadelphia), 1986.
- [16] Beckers J.M. Adaptive optics for astronomy: principles, performance, and applications // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. – 1993. – Vol. 31(1). – P. 13-62.
- [17] Atchison, D.A. Wavefront aberrations and their clinical application // *Clin. Exp. Optom.* – 2009. – Vol. 92 – P. 171-172.
- [18] 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.
- [19] Belenkii, M.S. Turbulent distortions of the spatial coherence of a laser beam / M.S. Belenkii, A.I. Kon, V.L. Mironov // *Soviet Journal of Quantum Electronics*. – 1977. – Vol. 7. – P. 287-290.
- [20] Dogariu, A. Propagation of partially coherent beams: Turbulence induced degradation / S. Amarande, A. Dogariu // *Optics Letters*. – 2003. – Vol. 28 – P. 10-12.
- [21] Watson, A.B. Computing human optical Point spread functions // *Journal of Vision*. – 2015. – Vol. 15(26). – P. 1-25.
- [22] Descloux, A. Aberrations of Point spread function of Multimode fiber due to partial mode excitation / A. Descloux, L.V. Amitonova, W.H.P. Pepijn // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24(16). – P. 18501-18512.

- [23] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [24] Reddy, A.N.K. Far-field light imaging in the presence of atmospheric turbulence with rotating anti-phase apertures: theoretical investigation / A.N.K. Reddy [et al.] // *IEEE Proceedings*. – 2017. – P. 1008-1012.
- [25] Porfirev, A.P. Study of propagation of vortex beams in aerosoloptical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics*. – 2017 – Vol. 56(11). – P. 8-15.
- [26] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paranin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74.
- [27] Jacquinot, P. Apodization / P. Jacquinot, B. Roizen-Dossier // *Progress in Optics*. – 1964. – Vol. 3. – P. 29-32.
- [28] Barakat, R. Solution to the Lunenberg Apodization problems // *JOSA*. – 1962. – № 52. – P. 264-272.
- [29] Dowski, E.R. Extended depth of field through wavefront coding / E.R. Dowski, W.T. Cathey // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34. – P. 1859-1866.
- [30] Pan, C. The extension ratio of depth of field by wavefront coding method / C. Pan, J. Chen, R. Zhang, S. Zhuang // *Opt Express*. – 2008. – Vol. 16(17). – P. 13364-13371.
- [31] Khonina, S.N. Generalized apodization of an incoherent imaging system aimed for extending the depth of focus / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2015. – Vol. 25(4). – P. 626-631.
- [32] Cheng, L. Asymmetric apodization / L. Cheng, G.G. Siu // *Measurement and Technology*. – 1991. – Vol. 2(3). – P. 198-202.
- [33] Siu, G.G. Asymmetric apodization applied to linear arrays / G.G. Siu, M. Cheng, L. Cheng // *J. Phys. D.: Applied Physics*. – 1997. – Vol. 30(5). – P. 787-792.
- [34] Khonina, S.N. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *J. Mod. Opt.* – 2011. – Vol. 58(9). – P. 748-760.
- [35] Khonina, S.N. Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2011 – Vol. 20(1). – P. 23-42.
- [36] Клебанов, Я.М. Компенсация аберраций 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.
- [37] Reddy, A.N.K. Complex pupil masks for aberrated imaging of closely spaced objects / A.N.K. Reddy, D.K. Sagar, S.N. Khonina // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 123(6). – P. 940-949.
- [38] Хонина, С.Н. Минимизация светового и теневого фокального пятна с контролируемым ростом боковых лепестков в фокусирующих системах с высокой числовой апертурой / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 438-451.
- [39] Khonina, S.N. Minimizing the bright/shadow focal spot size with controlled side-lobe increase in high-numerical-aperture focusing systems / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Advances in Optical Technologies*, 2013. – 13 p.
- [40] Khonina, S.N. Reduction of the focal spot size in high-aperture focusing systems at inserting of aberrations / S.N. Khonina, E.A. Pelevina // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2011. – Vol. 20(3). – P. 155-167.
- [41] Khonina, S.N. Analysis of wave aberration influence on reducing the focal spot size in a high-aperture focusing system / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, E.A. Pelevina // *J. Opt.* – 2011. – 13 p.
- [42] Barakat, R. Application of apodization to increase two-point resolution by Sparrow criterion under incoherent illumination // *JOSA*. – 1962. – Vol. 52. – P. 276-283.

- [43] Siu, G.G. Improved side-lobe suppression in asymmetric apodization / G.G. Siu, L. Cheng, D.S. Chiu // *J. Phys. D.: Applied Physics*. – 1994. – Vol. 27(3). – P. 459-463.
- [44] Kowalczyk, M. Asymmetric apodization in confocal scanning systems / M. Kowalczyk, C.J. Zapata-Rodriguez, M. Martinez-Corral // *Appl. Opt.* – 1998. – Vol. 37(35). – P. 8206-8214.
- [45] Yang, W. One-sided achromatic phase apodization for imaging of extra solar planets / W. Yang, A.B. Kotinski // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 605(2). – P. 892-901.
- [46] Reddy, A.N.K. Point spread function of optical systems apodised by a semicircular array of 2D aperture functions with asymmetric apodization / A.N.K. Reddy, D.K. Sagar // *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*. – 2012. – Vol. 12(2). – P. 83-88.
- [47] Reddy, A.N.K. Asymmetric apodization for the comma aberrated point spread function / A.N.K. Reddy, D.K. Sagar, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 484-488. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-484-488.
- [48] Noll, R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *J. Opt. Soc. Am.* – 1976 – Vol. 66. – P. 207-211.
- [49] Wang, J.Y. Wave-front interpretation with Zernike polynomials / J.Y. Wang, D.E. Silva // *Appl. Opt.* – 1980 – Vol. 19. – P. 1510-1518.
- [50] 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 // *Proc. SPIE*. – 1998. – Vol. 3557. – P. 550-553.
- [51] Ha, Y. Diffractive optical element for Zernike decomposition / Y. Ha [et al.] // *Proc. SPIE*. – 1998. – Vol. 3557. – P. 191-197.
- [52] Sheppard, C.J.R. Zernike expansion of pupil filters: optimization of the signal concentration factor // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2015. – Vol. 32(5). – P. 928-933.
- [53] Porfirev, A.P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Proc. SPIE*. – 2016. – Vol. 9807.
- [54] Скиданов, Я.Р. Исследование возможности повышения разрешения оптических систем в присутствии aberrаций на основе амплитудной аподизации // *Информационные технологии и нанотехнологии: сб. науч. тр. – Изд-во Сам. ун-та, 2018. – С. 475-482.*
- [55] Хонина, С.Н. Фазовая аподизация изображающей системы с целью увеличения глубины фокуса в когерентном и некогерентном случаях // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 357-364.
- [56] Khonina, S.N. Extended depth of focus through imaging system's phase apodization in coherent and incoherent cases / S.N. Khonina, A.S. Demidov // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2014. – Vol. 23(3). – P. 130-139.
- [57] Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. – М.: «Мир», 1970. – 364 с.

# Analysis of the possibility of increasing the resolution based on apodization for partially coherent optical systems in the presence of aberrations

Y.R. Skidanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** The degree of coherence of radiation is an important characteristic on which the interference properties of light fields and, as a consequence, the resolution of optical systems depend. When propagating over long distances even in free space, initially completely coherent or incoherent radiation becomes partially coherent. This fact should be taken into account in the formation of optical images along with the influence of wave front aberrations. In this paper, we investigate the change in the resolution of the system for two near-point light sources depending on the degree of spatial coherence in the presence of different aberrations. The possibility of improving the resolution in the considered situations on the basis of the amplitude apodization of the optical system is also investigated.