

Формирование изображения объекта из нескольких источников с различной фазой и когерентностью

Я.Р. Скиданов¹

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

Аннотация. Изображение объекта существенно зависит от когерентности источников излучения и их фазовых соотношений. Это обстоятельство необходимо учитывать при формировании оптических изображений наряду с учетом влияния aberrаций волнового фронта. В данной работе исследуется изменение картины изображения объекта, состоящего из нескольких близкорасположенных точечных источников света различной яркости и размеров в зависимости от степени пространственной когерентности и фазовых соотношений.

1. Введение

Степень когерентности излучения является важной характеристикой, от которой зависят интерференционные свойства световых полей и, как следствие, разрешение оптических систем. Даже полностью когерентное или некогерентное излучение становится частично когерентным при рассеянии [1], а также при распространении в свободном пространстве на большие расстояния [2]. Состояние когерентности существенно влияет на качество формирования оптических изображений [3], что необходимо учитывать наряду с влиянием aberrаций волнового фронта [4-8]. К основным причинам возникновения искажений волнового фронта можно отнести турбулентность атмосферы, погрешности изготовления оптических элементов системы, а также неточность юстировке системы [9-15].

В различных приложениях желательно иметь источники излучения с различной степенью когерентности. Например, низкая временная когерентность (но в сочетании с высокой пространственной когерентностью) требуется для когерентной томографии [16-18]. А для решения задач интерферометрии, голографии и детектирования необходимо излучение с высокой степенью пространственной и временной когерентности [19-25].

Одним из способов улучшения разрешения является аподизация зрачка линзы [26-31]. Как правило, аподизация сопровождается не только положительными эффектами (увеличение глубины фокуса [28-31] и уменьшение размера фокального пятна [32, 33]), но и существенным изменением структуры функции рассеяния точки (ФРТ) и ростом боковых лепестков [34-36], ухудшающих изображающие свойства. Поэтому аподизация широко применяется в фокусирующих [37, 38] и сканирующих [39, 40] оптических системах, в микроскопах для повышения контраста [41, 42], а также в различных приложениях для разрешения двух близкорасположенных источников излучения [43-48].

В данной работе исследуется изменение картины изображения объекта, состоящего из нескольких близкорасположенных точечных источников света различной яркости и размеров в зависимости от степени пространственной когерентности и фазовых соотношений.

2. Теория

В данной работе рассматриваются объекты, состоящие из нескольких близкорасположенных точечных источников света различной яркости и размеров:

$$\Psi(x, y) = \sum_{p=1}^P c_p \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma_p^2}\right) \exp(i\alpha_p x + i\beta_p y + i\varphi_p), \quad (1)$$

где $|c_p|^2$ - мощность источника света, φ_p - начальная фаза источника. Каждый источник описывается гауссовой функцией, а размер источника определяется параметром σ_p . Расположение источников и, соответственно, расстояния между ними задаются параметрами α_p, β_p .

Влияние степени когерентности источников учитываются с использованием следующей формулы:

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

где μ - коэффициент когерентности источников света, A_1, A_2 - соответствующие амплитуды φ_1, φ_2 - соответствующие фазы.

Чтобы построить изображение исходного объекта $a(\mathbf{x})$ в когерентном случае ($\mu=1$) можно использовать следующее выражение [30, 31]:

$$b(\mathbf{x}) = \int S_a(\mathbf{u})P(\mathbf{u}) \exp\left(\frac{ik\mathbf{x}\mathbf{u}}{f}\right) d\mathbf{u} \quad (3)$$

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

Разрешающую способность системы будем определять по критериям Релея и Спэрроу [49]. В первоначальной форме эти критерии применялись только к двум точечным источникам с одинаковыми, но смещенными ФРТ (картинами Эйри). Спэрроу сформулировал критерий в следующем виде: две точки объекта разрешаются, если вторая производная результирующего распределения интенсивности равна нулю в точке, соответствующей середине между соответствующими гауссовыми изображениями точек. В данной работе применяется модифицированный критерий Спэрроу попарно для каждой двух из набора объектных точек с различной интенсивностью [47].

3. Результаты моделирования

В данном разделе исследуется влияние когерентности на ФРТ нескольких близко расположенных источников света, а также разрешимость системы при разных параметрах источников (начальная фаза, мощность, размер источника). 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).

На рисунках 1-6 показаны изображения объектов, состоящих из 8 источников света с различной когерентностью, мощностью и фазовыми соотношениями.

Как видно из рисунков, с увеличением когерентности разрешение в изображении падает. Чтобы его улучшить можно внести в соседние источники различные начальные фазы φ_p , тогда

изображения источников света становятся более различимы. Изменение мощности или размера источников не улучшает ситуацию.

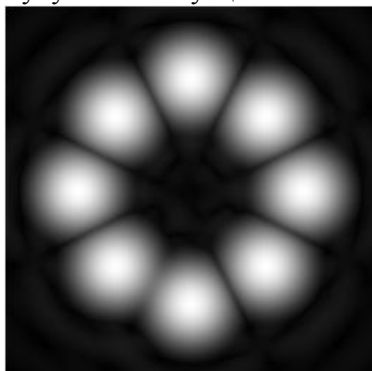


Рисунок 1. ФРТ некогерентных ($\mu=0$) источников света.

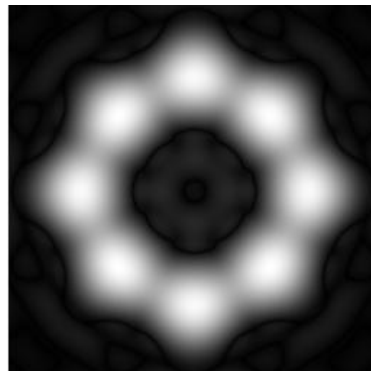


Рисунок 2. ФРТ с коэффициентом когерентности $\mu=0,5$.

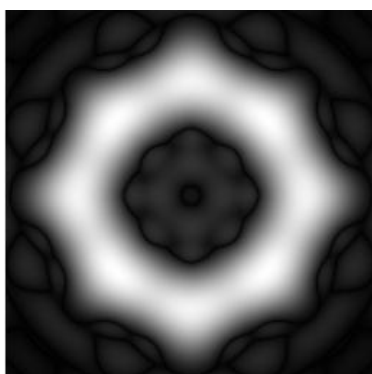


Рисунок 3. ФРТ с когерентными ($\mu=1$) источниками света.

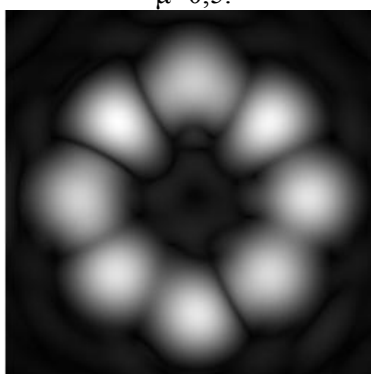


Рисунок 4. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света с различными начальными фазами.

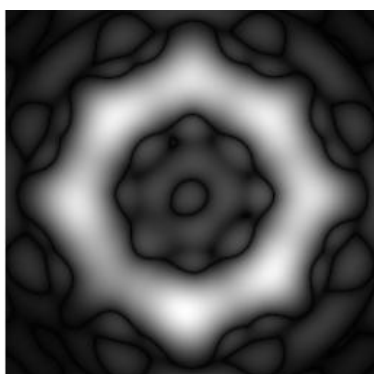


Рисунок 5. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света с разной мощностью источников.

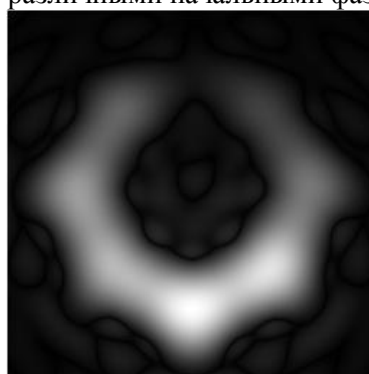


Рисунок 6. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света с разными размерами.

На рисунках 7-12 показаны изображения объектов, состоящих из 6 источников света с различной когерентностью, мощностью и фазовыми соотношениями. В этом случае наблюдается аналогичная ситуация.

4. Заключение

Проведенное исследование разрешения когерентной оптической системы показало, что с увеличением когерентности разрешение близкорасположенных источников света ухудшается.

Однако при внесении в источники различных начальных фаз разрешение можно улучшить. Изменение мощности или размера источников не улучшает ситуацию.

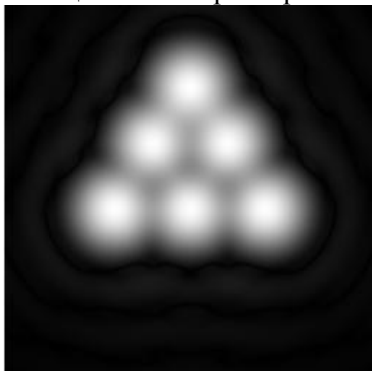


Рисунок 7. ФРТ некогерентных ($\mu=0$) источников света.

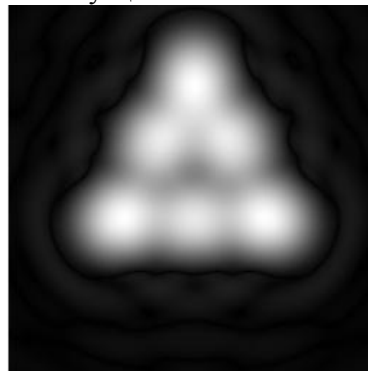


Рисунок 8. ФРТ с коэффициентом когерентности $\mu=0,5$.

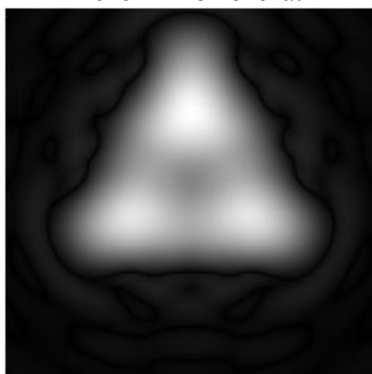


Рисунок 9. ФРТ с когерентными ($\mu=1$) источниками света.

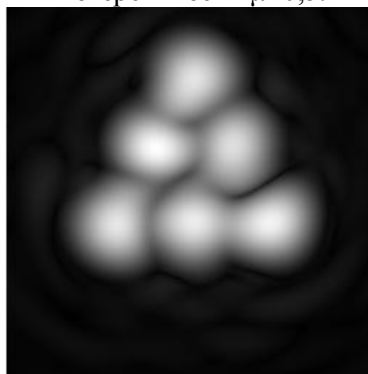


Рисунок 10. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света с различными начальными фазами.

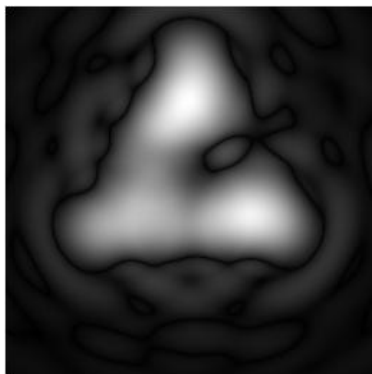


Рисунок 11. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света, с разной мощностью источников.

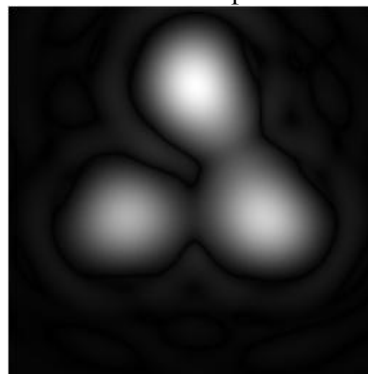


Рисунок 12. ФРТ когерентных ($\mu=1$) источников света с разными размерами.

5. Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-37-00056-мол_а).

6. Литература

- [1] Jansson, J. Spatial coherence discrimination in scattering / J. Jansson, T. Jansson, E. Wolf // Optics Letters. – 1988. – Vol. 13 – P. 1060-1062.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zernike, F. Diffraction and optical image formation // *Proceedings of the Physical Society*. – 1948. – Vol. 61. – P. 158-164.
- [5] Welford, W.T. *Aberrations of optical systems* – Adam Hilger Press (Bristol and Philadelphia), 1986.
- [6] Beckers, J.M. Adaptive optics for astronomy: principles, performance, and applications // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. – 1993. – Vol. 31(1). – P. 13-62.
- [7] Atchison, D.A. Wavefront aberrations and their clinical application // *Clin. Exp. Optom*. – 2009. – Vol. 92. – P. 171-172.
- [8] Хорин, П.А. Анализ aberrаций роговицы человеческого глаза / П.А. Хорин, С.Н. Хонина, А.В. Карсаков, С.Л. Бранчевский // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Том. 40, № 6. – С. 810-817. DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817.
- [9] 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.
- [10] Dogariu, A. Propagation of partially coherent beams: Turbulence induced degradation / S. Amarande, A. Dogariu // *Optics Letters*. – 2003. – Vol. 28. – P. 10-12.
- [11] 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, P. Verma, S.N. Khonina, M. Hashemi, M. Martinez-Corral // *IEEE Proceedings*. – 2017. – P. 1008-1012. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915499.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Porfirev, A.P. Study of propagation of vortex beams in aerosoptical 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.
- [15] 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. Pararin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74.
- [16] Fercher, A.F. Optical coherence tomography / A.F. Fercher, C.K. Hitzenberger // *Progress in optics*. – 2002. – Vol. 44. – P. 215-301.
- [17] Baleine, E. Variable coherence tomography / A. Dogariu, E. Baleine // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29. – P. 1233-1235.
- [18] Brezinski, M. *Optical coherence tomography: Principles and applications* // Burlington, MA: Academic Press, 2006.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Karpeev, S.V. High-effective fiber sensors based on transversal mode selection / S.V. Karpeev, V. S. Pavelyev, S.N. Khonina, N. L. Kazanskiy // *Proceedings SPIE*. – 2005. – Vol. 58(54). – P. 163-169.

- [23] Gbur, G. Phase singularities and coherence vortices in linear optical systems / G. Gbur, T.D. Visser // *Optics Communications*. – 2006. – Vol. 259. – P. 428-435.
- [24] Davis, B.J. Computationally efficient coherent-mode representations / B.J. Davis, R.W. Schoonover // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34. – P. 923-925.
- [25] Любопытов, В.С. Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод / В.С. Любопытов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 352-359.
- [26] Jacquinot, P. Apodization / P. Jacquinot, B. Roizen-Dossier // *Progress in Optics*. – 1964. – Vol. 3. – P. 29-32.
- [27] Barakat, R. Solution to the Lunenberg Apodization problems // *JOSA*. – 1962. – Vol. 52. – P. 264-272.
- [28] Dowski, E.R. Extended depth of field through wavefront coding / E.R. Dowski, W.T. Cathey // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34. – P. 1859-1866.
- [29] 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.
- [30] 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
- [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] Kant, R. Superresolution and increased depth of focus: an inverse problem of vector diffraction // *J. Mod. Opt.* – 2000. – Vol. 47(5). – P. 905-916.
- [33] Khonina, S.N. Narrowing of a light spot at diffraction of linearly-polarized beam on binary asymmetric axicons / S.N. Khonina, D.V. Nesterenko, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2012. – Vol. 21(1). – P. 17-26. DOI: 10.3103/S1060992X12010043.
- [34] 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.
- [35] 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. Вологовский // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 438-451.
- [36] 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. – Vol. 13.
- [37] Lerman, G.M. Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions / G.M. Lerman, U. Levy // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 4567-4581.
- [38] Khonina, S.N. Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52(9). – P. 091711-7. DOI: 10.1117/1.OE.52.9.091711.
- [39] Hecht, B. Scanning near-field optical microscopy with aperture probes: fundamentals and applications / B. Hecht, B. Sick, U.P. Wild, V. Deckert, R. Zenobi, O.J.F. Martin, D.W. Pohl // *J. Chem. Phys.* – 2000. – Vol. 112. – P. 7761-7774.
- [40] Boruah, B.R. Laser scanning confocal microscope with programmable amplitude, phase, and polarization of the illumination beam / B.R. Boruah, M.A.A. Neil // *Rev. Sci. Instrum.* – 2009. – Vol. 80. – P. 013705.
- [41] Situ, G. Phase contrast enhancement in microscopy using spiral phase filtering / G. Situ, M. Warber, G. Pedrini, W. Osten // *Opt. Commun.* – 2010. – Vol. 283. – P. 1273.
- [42] Maurer, C. What spatial light modulators can do for optical microscopy / C. Maurer, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Laser Photon. Rev.* – 2011. – Vol. 5. – P. 81-101.

- [43] Barakat, R. Application of apodization to increase two-point resolution by Sparrow criterion under incoherent illumination // *JOSA*. – 1962. – Vol. 52. – P. 276-283.
- [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. 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.
- [47] 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.
- [48] Попов, А.В. Формирование световых точек на пределе дифракционного разрешения // Сборник трудов международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ). – Самара: Новая техника. – 2016. – Т. 2. – С. 235-242.
- [49] Thompson, B.J. Selected papers on apodization: coherent optical systems / B.J. Thompson, J.P. Mills // Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1996.

Forming an image of an object from several sources with different phase and coherence

Y.R. Skidanov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The image of an object depends significantly on the coherence of the radiation sources and their phase relationships. This circumstance must be taken into account when forming optical images, alongside with taking into account the influence of wave front aberrations. In this paper, we study the change in the image picture of an object consisting of several closely spaced point light sources of different brightness and sizes depending on the degree of spatial coherence and phase relationships.