

Фазовая аподизация изображающей системы по отдельным цветовым каналам для увеличения глубины фокуса

А.П. Дзюба¹, С.Б. Попов^{1,2}, П.Г. Серафимович²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 44308

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В статье рассчитан бинарный оптический элемент для фазовой аподизации функции зрачка оптической системы. Данный оптический элемент обеспечивает увеличение глубины фокуса оптической системы хотя бы по одному цветовому каналу для определенного значения на оптической оси. Оптимизация бинарного оптического элемента выполнена методом имитации отжига. Показано, что рассчитанный оптический элемент обеспечивает увеличение глубины фокуса оптической системы примерно в два раза по сравнению с оптическим элементом на основе бинарного аксикона. Рассчитанный оптический элемент может быть использован в задачах машинного зрения для классификации изображений.

1. Введение

Известно, что оптические системы чувствительны к дефокусировке и хроматическим aberrациям. Увеличение глубины фокуса оптической системы позволяет ослабить эту чувствительность и ее негативные последствия в размытии дефокусированных изображений. Однако простое увеличение глубины фокуса (DOF) за счет уменьшения зрачка или числовой апертуры системы приводит к ухудшению разрешения. Одним из способов увеличения DOF без ухудшения разрешения является «кодирование» волнового фронта [1, 2], что фактически является фазовой аподизацией зрачка линзы [3, 4]. Как правило, аподизация сопровождается не только положительными эффектами (увеличение DOF и уменьшение размера фокального пятна [5, 6]), но и существенным изменением структуры функции рассеяния точки (PSF) и ростом боковых лепестков [7, 8], ухудшающих изображающие свойства. Поэтому аподизация широко применяется в фокусирующих [9, 10] и сканирующих [11-14] оптических системах, а также в микроскопах для повышения контраста [15-17], а также в различных приложениях для разрешения двух близкорасположенных источников излучения [18-20]. В изображающих системах применение аподизации требует дополнительной, как правило, цифровой операции декодирования [21-26]. Несмотря на развитие различных методов декодирования, включая нейронные сети [27-31], при оптимизации аподизирующей функции желателен соблюдать компромисс между увеличением DOF и искажением PSF.

Известно применение кубической фазовой аподизации [32-35] с целью увеличения DOF. Однако изготовление полутонного оптического элемента с кубической фазой является

сложным процессом. Бинарные оптические фазовые элементы более просты в изготовлении. Одним из самых известных бинарных оптических элементов, используемых для увеличения глубины фокуса, является кольцевая бинарная решетка или бинарный аксикон [36-38]. Заметим, что для достижения именно углубления фокуса, а не формирования кольцевого распределения в фокальной плоскости требуется использование слабых аксиконов, желательного с подстраиваемой числовой апертурой [39-41].

Слабый аксикон содержит всего несколько кольцевых зон, радиусы которых можно отдельно оптимизировать с целью достижения определенной цели. В частности, известно, что бинарные оптические элементы вносят существенные хроматические aberrации. Компенсация этих aberrаций требует дополнительных усилий при оптимизации оптического элемента.

В данной работе мы предлагаем использовать хроматические aberrации для оптимизации PSF отдельно по каждому цветовому каналу с целью увеличения DOF. Для этого используется фазовая аподизация апертуры с помощью радиально-симметричного бинарного фазового элемента. Данный оптический элемент оптимизируется с помощью алгоритма имитации отжига (simulated annealing). Полученное изображение может быть использовано для решения задачи классификации объектов.

2. Теоретический анализ радиально-симметричной бинарной фазовой аподизации

Амплитуда S в фокальной плоскости изображающей системы может быть записана следующим образом:

$$S(r, z) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(r\rho) \exp(iz\rho^2/2) \rho d\rho, \quad (1)$$

где $P(\rho)$ является функцией зрачка, r и z являются радиальной и осевой координатами:

$$r = \frac{2\pi R \sin\alpha}{\lambda},$$
$$z = \frac{2\pi Z \sin^2(\alpha/2)}{\lambda},$$

Здесь $\sin\alpha$ является числовой апертурой, а R и Z обозначают нормализованные радиальную и осевую координаты.

Вдоль оптической оси амплитуда светового поля записывается следующим образом:

$$S(0, z) = 2 \int_0^1 P(\rho) \exp(iz\rho^2/2) \rho d\rho = \int_0^1 Q(t) \exp(izt/2) dt. \quad (2)$$

Будем полагать, что $P(\rho)$ является действительной функцией. Такое допущение оправдано, т.к. мы рассматриваем бинарные фазовые элементы, где фаза принимает значения 0 и π , следовательно амплитуда равна 1 или -1. В этом случае можно записать следующее соотношение:

$$S^*(0, z) = \int_0^1 [Q(t)]^* \exp(-izt/2) dt = \int_0^1 Q(t) \exp(i(-z)t/2) dt = S(0, -z). \quad (3)$$

3. Расчет базового радиально-симметричного бинарного фазового элемента

Далее показаны результаты расчета для линзы с фокусным расстоянием $f=4.5$ мм, радиусом линзы $R=0.9$ мм при длинах волны освещающего пучка $\lambda=420, 535$ и 640 нм. Для неаподизированной функции зрачка (рисунок 1) распределение интенсивности вдоль оптической оси показано на рисунке 2.



Рисунок 1. Неаподизированная функция зрачка.

Три верхних изображения на рисунке 2 показывают распределение интенсивности для красного, зеленого и синего каналов. Нижний график показывает осевые сечения трех цветовых каналов. На рисунке 2 видно, что при дефокусировке интенсивность светового поля существенно меняется, сокращая при этом DOF.

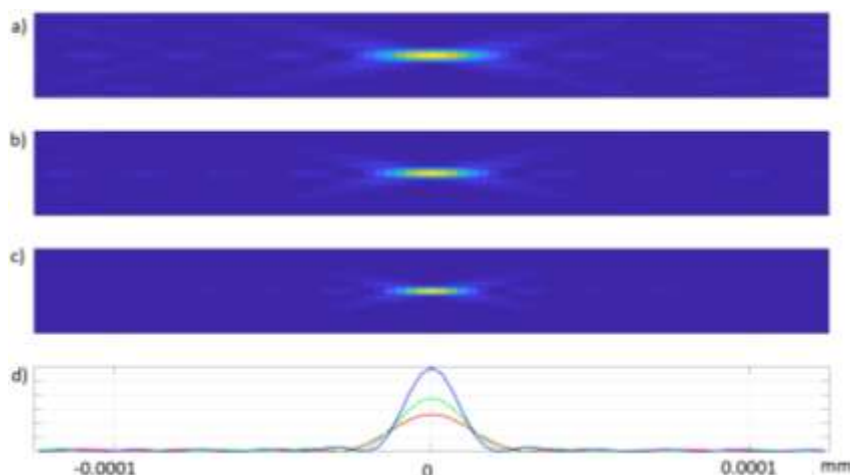


Рисунок 2. Распределение интенсивности на оптической оси (d) для красного (a), зеленого (b) и синего (c) цветовых каналов.

Известным способом увеличения DOF оптической системы является использование аксикона в плоскости линзы. Фаза аксикона после бинаризации показана на рисунке 3.

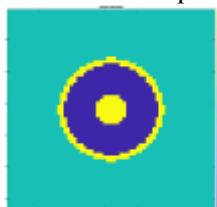


Рисунок 3. Фаза бинарного аксикона.

На рисунке 4 показано распределение интенсивности вдоль оптической оси для трех цветовых каналов в результате аподизации бинарным фазовым аксиконом. Коэффициент рефракции аксикона равен 1.46. По сравнению с рисунком 2 заметно значительное увеличение DOF. Параметр аксикона подобран, чтобы максимизировать DOF. При этом зона DOF определяется как область где нормированная по энергии цветового канала функция интенсивности принимает значение выше 0.4×10^{-3} Вт/м² хотя бы для одного цветового канала. Размер DOF составил $\pm 1.9 \times 10^{-4}$ мм.

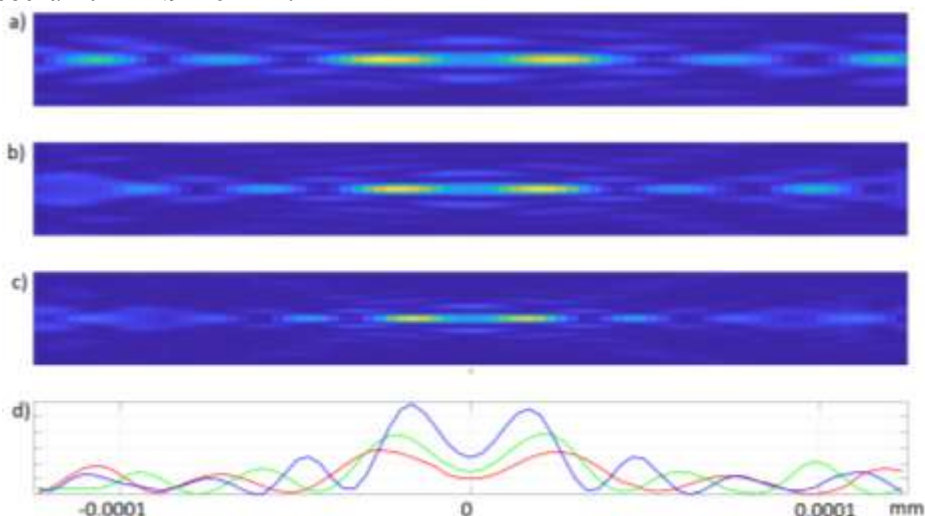


Рисунок 4. Распределение интенсивности светового поля вдоль оптической оси (d) для красного (a), зеленого (b) и синего (c) цветовых каналов в результате аподизации бинарным фазовым аксиконом.

4. Оптимизация бинарного фазового аксикона отдельно по трем цветовым каналам

В задачах машинного зрения возникает проблема классификации изображений. Часто классифицируемый объект на изображении является черно-белым или серым (например, черные цифры номера). При этом изображение регистрируется камерой с цветным сенсором. При последующей классификации такого изображения, например, с помощью нейронной сети, достаточно четкого изображения по одному цветовому каналу.

Нашей целью является максимизация DOF с помощью оптимизации бинарной фазы. DOF по-прежнему определяется как область где нормированная по энергии цветового канала функция интенсивности принимает значение выше 0.4×10^{-3} Вт/м² хотя бы для одного цветового канала.

Имитация отжига — это стохастический метод оптимизации, который может быть использован там, где не существует точных методов решения задачи или детерминированные методы слишком сложны вычислительно. Одним из основных преимуществ метода имитации отжига является то, что он способен избежать локальных минимумов. В нашей задаче метод имитации отжига состоит из следующих трех этапов: случайным образом изменить фазовый рельеф, оценить производительность данного рельефа и принять этот рельеф, если он лучше, чем оптимальный на данный момент рельеф [42]. Алгоритм метрополии обычно используется для вычисления вероятности принятия решения (нового рельефа).

$$p_a = \begin{cases} e^{-g\Delta E/T}, & \Delta E > 0 \\ 1, & \Delta E \leq 0 \end{cases},$$

где p_a - вероятность принятия, g - постоянная, ΔE разница между двумя решениями (двумя возможными рельефами) и T – монотонно изменяемый параметр.



Рисунок 5. Фаза оптимизированного бинарного аксикона.

На рисунке 5 показан фазовый рельеф, полученный в результате применения метода имитации отжига. Нормированные радиусы перепадов рельефа составляют 0.14, 0.47, 0.93.

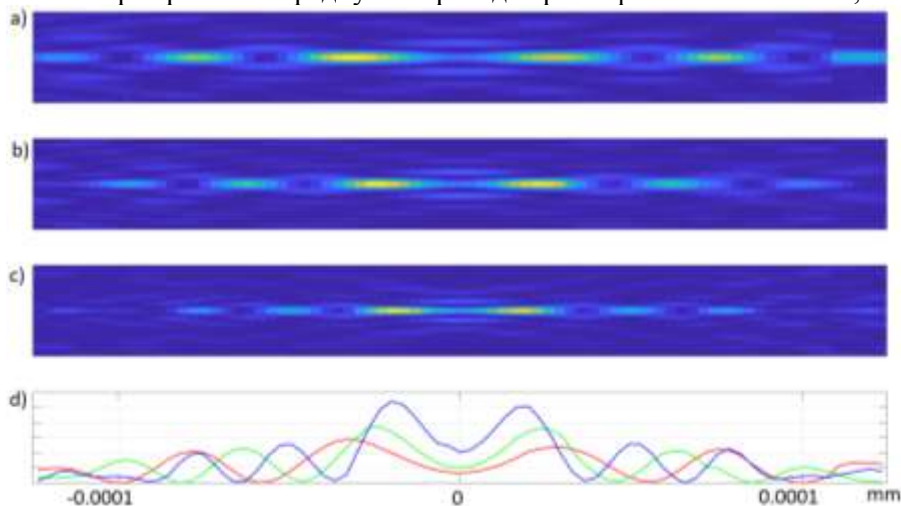


Рисунок 6. Распределение интенсивности светового поля вдоль оптической оси для трех цветовых каналов в результате аподизации бинарным фазовым аксиконом.

На рисунке 6 показано распределение интенсивности вдоль оптической оси для трех цветовых каналов в результате аподизации бинарным фазовым аксиконом представленным на

рис.5. Размер DOF составил $\pm 3.05 \times 10^{-4}$ мм. По сравнению с рисунком 4 размер DOF увеличен примерно в два раза.

5. Заключение

Предложен новый подход к увеличению глубины фокуса оптической системы для задач машинного зрения. Рассчитан фазовый оптический элемент, который обеспечивает увеличение глубины фокуса оптической системы хотя бы по одному цветовому каналу для определенного значения на оптической оси. Данный оптический элемент используется для фазовой аподизации функции зрачка оптической системы. Оптимизация бинарного оптического элемента выполнена методом имитации отжига. Показано, что рассчитанный оптический элемент обеспечивает увеличение глубины фокуса оптической системы примерно в два раза по сравнению с оптическим элементом на основе бинарного аксикона. В дальнейшем авторы планируют использовать рассчитанный оптический элемент в задачах машинного зрения для классификации изображений.

6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No 19-29-09054.

7. Литература

- [1] Dowski, E.R. Extended depth of field through wave-front coding / E.R. Dowski Jr, W.T. Cathey // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34. – P. 1859-1866.
- [2] van der Gracht, J. Broadband behavior of an optical-digital focus-invariant system / J. van der Gracht, E.R. Dowski Jr, M.G. Taylor, D.M. Deaver // *Opt. Lett.* – 1996. – Vol. 21. – P. 919-921.
- [3] Jacquinot, P. Apodization / P. Jacquinot, B. Roizen-Dossier // *Progress in Optics.* – 1964. – Vol. 3. – P. 29-32.
- [4] Wang, H. High focal depth with a pure-phase apodizer / H. Wang, F. Gan // *Appl. Opt.* – 2001. – Vol. 40. – P. 5658-5662.
- [5] Kant, R. Superresolution and increased depth of focus: an inverse problem of vector diffraction // *J. Mod. Opt.* – 2000. – Vol. 47(5). – P. 905-916.
- [6] 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. – P. 095702.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Sun, C.-C. Ultrasmall focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation / C.-C. Sun, C.-K. Liu // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28. – P. 99-101.
- [10] Liu, Z. Diffractive infrared lens with extended depth of focus / Z. Liu, A. Flores, M. R. Wang, J. J. Yang // *Opt. Eng.* – 2007. – Vol. 46. – P. 018002.
- [11] Reddick, R.C. New form of scanning optical microscopy / R.C. Reddick, R.J. Warmark, T.L. Ferrel // *Phys. Rev. B.* – 1989. – Vol. 39. – P. 767-770.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] Fürhapter, S. Spiral phase contrast imaging in microscopy / S. Fürhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – P. 689-694.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Grimes, D.N. Two-point resolution with partially coherent light / D.N. Grimes, B.J. Thompson // *Journal of the Optical Society of America.* – 1967. – Vol. 57(11). – P. 1330-1334.
- [19] Xu, B. Super-resolution imaging via aperture modulation and intensity extrapolation / B. Xu, Z. Wang, J. He // *Scientific Reports.* – 2018. – Vol. 8. – P. 15216.
- [20] Reddy, A.N.K. Apodization for improving the two-point resolution of coherent optical systems with defect of focus / A.N.K. Reddy, S.N. Khonina // *Applied Physics B.* – 2018. – Vol. 124. – P. 229. DOI: 10.1007/s00340-018-7101-z.
- [21] Raveh, I. Digital method for defocus correction: experimental results / I. Raveh, D. Mendlovic, Z. Zalevsky, A. W. Lohmann // *Opt. Eng.* – 1999. – Vol. 38(10). – P. 1620-1626.
- [22] Cathey, W.T. New paradigm for imaging systems / W.T. Cathey, E.R. Dowski // *Applied Optics.* – 2002. – Vol. 41(29). – P. 6080-6092.
- [23] Xu, L. Deep convolutional neural network for image deconvolution / L. Xu, J.S.J. Ren, C. Liu, J. Jia // *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014. – P. 1790-1798.
- [24] Asif, M.S. FlatCam: Thin, Lensless Cameras Using Coded Aperture and Computation / M.S. Asif, A. Ayremlou, A. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, R.G. Baraniuk // *IEEE Trans. Computational Imaging.* – 2017. – Vol. 3(3). – P. 384-397.
- [25] Eilertsen, G. HDR image reconstruction from a single exposure using deep CNNs / G. Eilertsen, J. Kronander, G. Denes, R. Mantiuk, J. Unger // *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia).* – 2017. – Vol. 36. – P. 6.
- [26] Sitzmann, V. End-to-end Optimization of Optics and Image Processing for Achromatic Extended Depth of Field and Super-resolution Imaging / V. Sitzmann, S. Diamond, Y. Peng, X. Dun, S. Boyd, W. Heidrich, F. Heide, G. Wetzstein // *ACM Trans. Graph.* – 2018. – Vol. 37(4). – P. 114.
- [27] Gharbi, M. Deep joint demosaicking and denoising / M. Gharbi, G. Chaurasia, S. Paris, F. Durand // *ACM Trans. Graph.* – 2016. – Vol. 35. – P. 191.
- [28] Rivenson, Y. Deep learning microscopy / Y. Rivenson, Z. Göröcs, H. Günaydin, Y. Zhang, H. Wang, A. Ozcan // *Optica.* – 2017. – Vol. 4(11). – P. 1437-1443.
- [29] Zhao, H. Loss functions for image restoration with neural networks / H. Zhao, O. Gallo, I. Frosio, J. Kautz // *IEEE Transactions on Comput. Imaging.* – 2017. – Vol. 3. – P. 47-57.
- [30] Elmaleh, S. Learned phase coded aperture for the benefit of depth of field extension / S. Elmaleh, R. Giryes, E. Marom // *Optics Express.* – 2018. – Vol. 26(12). – P. 15316-15331.
- [31] Hershko, E. Multicolor localization microscopy and point-spread-function engineering by deep learning / E. Hershko, L.E. Weiss, T. Michaeli, Y. Shechtman // *Optics Express.* – 2019. – Vol. 27(5). – P. 6158- 6183.
- [32] Marks, D.L. Three-dimensional tomography using a cubic-phase plate extended depth-of-field system / D.L. Marks, R.A. Stack, D.J. Brady // *Opt. Lett.* – 1999. – Vol. 24. – P. 253-255.
- [33] Narayanswamy, R. Extending the imaging volume for biometric iris recognition / R. Narayanswamy, G.E. Johnson, P.E.X. Silveira, H.B. Wach // *Appl. Opt.* – 2005. – Vol. 44. – P. 701-712.
- [34] Silveira, P.E.X. Signal-to-noise analysis of task-based imaging systems with defocus / P.E.X. Silveira, R. Narayanswamy // *Appl. Opt.* – 2006. – Vol. 45. – P. 2924-2934.
- [35] Simonov, A.N. Cubic optical elements for an accommodative intraocular lens / A.N. Simonov, G. Vdovin, M.C. Rombach // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14(17). – P. 7757-7775.

- [36] Mikuia, G. Diffractive elements for imaging with extended depth of focus / G. Mikuia, A. Kolodziejczyk, M. Makowski, C. Prokopowicz, M. Sypek // *Optical Engineering*. – 2005. – Vol. 44(5). – P. 058001-7.
- [37] Хонина, С.Н. Применение аксиконов в изображающих системах для увеличения глубины фокуса / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2011. – Т. 13, № 6. – С. 7-15.
- [38] Khonina, S.N. Dynamic focal shift and extending depth of focus based on the masking of the illuminating beam and using an adjustable axicon / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.P. Porfirev // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2019. – Vol. 36(6). – P. 1039-1047. DOI:10.1364/JOSAA.36.001039.
- [39] Yun, M. Focal shift and extended focal depth with tunable pupil filter / M. Yun, E.-H. Lee // *J. Mod. Opt.* – 2008. – Vol. 55. – P. 2857–2863.
- [40] Romero, L.A. Programmable diffractive optical elements for extending the depth of focus in ophthalmic optics / L.A. Romero, M.S. Millán, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk // *Proc. SPIE*. – 2015. – Vol. 9287. – P. 92871E.
- [41] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B*. – 2018. – Vol. 124. – P. 191. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [42] Kirkpatrick, S. Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi // *Science*. – 1983. – Vol. 220(4598). – P. 671-680.

Phase apodization of imaging system in separate color channels for extending depth of field

A.P. Dzyuba¹, S.B. Popov^{1,2}, P.G. Serafimovich²

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

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. The binary optical element for phase apodization of the pupil function of the optical system is calculated in the paper. This optical element provides an increase in the depth of focus of the optical system through at least one color channel for a certain value on the optical axis. The optimization of the binary optical element was performed by simulating annealing. It is shown that the calculated optical element provides an increase in the depth of focus of the optical system by about two times compared with an optical element based on a binary axicon. The calculated optical element can be used in machine vision problems for image classification.