ISSN 2782-2001
Системы анализа и обработки данных
том 96, № 4, 2024, с. 47–58

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data processing systems
Vol. 96, No. 4, 2024, pp. 47–58

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 535.411.854 DOI: 10.17212/2782-2001-2024-4-47-58

Увеличение пространственного разрешения в системах оптической микроскопии при использовании микрообъективов малой кратности*

В.И. ГУЖОВ[a], С.П. ИЛЬИНЫХ[b], Е.В. АНДРЮЩЕНКО[c]

630073, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ-НЭТИ)

[a] *vigguzhov@gmail* [b] *isp51@yandex.ru* [c] *andrushenkokv@gmail.com*

Системы оптической микроскопии являются важным методом исследования во многих медицинских и промышленных приложениях. Пространственное разрешение зависит от конструкции объектива, и поле зрения сужается по мере увеличения кратности. Максимальное поле зрения достигается при использовании объективов с малым значением кратности увеличения и соответственно с низким пространственным разрешением. Объективы с низким разрешением конструктивно просты в изготовлении и поэтому недороги. Использование таких объективов для повышения пространственного разрешения является перспективным направлением.

Целью настоящей работы является исследование возможности увеличения пространственного разрешения систем оптической микроскопии, использующих их микрообъективы с малым значением кратности увеличения с сохранением присущего им широкого поля зрения. Улучшение пространственного разрешения осуществляется с помощью предлагаемого в статье подхода, основанного на технологии субпиксельного сканирования и введения апертурной функции, не зависящей от свойств изображения. В этом случае спектр изображения, синтезированного с помощью технологии субпиксельного сканирования, компенсируется множителем предлагаемой апертурной функции, вид которой зависит только от типа апертуры объектива и не зависит от свойств исследуемого объекта. Для реализации субпиксельного сканирования сдвигов была проведена модификация предметного столика металлографического агрегатного микроскопа МЕТАМ-Р1. Под управлением ЭВМ двухкоординатный столик может позиционироваться с высокой точностью. Полученные экспериментальные результаты показывают реализуемость предлагаемого подхода.

Недостатком предложенного подхода является необходимость использования дополнительной системы субпиксельного сдвига. Однако во многих случаях использование субпиксельных сдвигов оказывается более предпочтительным, чем применение сложных объективов с большим разрешением и небольшим полем зрения.

* *Статья получена 22 ноября 2024 г.*
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 24-29-00006.

Ключевые слова: микроскопия, преобразование Фурье, фурье-образ, спектр, сверхразрешение, субпиксельное сканирование, микрообъектив, поле зрения, кратность увеличения, фотоматрицы, пиксел

ВВЕДЕНИЕ

В оптических микроскопах пространственное разрешение формируемого ими изображения определяется способностью различения двух соседних точечных объектов. В этом случае пространственное разрешение определяется расстоянием между образуемыми этими объектами дифракционными кольцами Эйри. Это расстояние зависит от числовой апертуры (NA^{obj}) микрообъектива микроскопа и длины волны источника освещения (λ) и оценивается критерием Рэлея [1, 2]:

$$R = 1,22\frac{\lambda}{2NA^{obj}}. \qquad (1)$$

На практике для длин волн видимого оптического диапазона пространственное разрешение оптических микроскопов оценивается величиной 200…250 нм [1, 2]. На объективе всегда указывается кратность увеличения (*N*x) и числовая апертура (рис. 1).

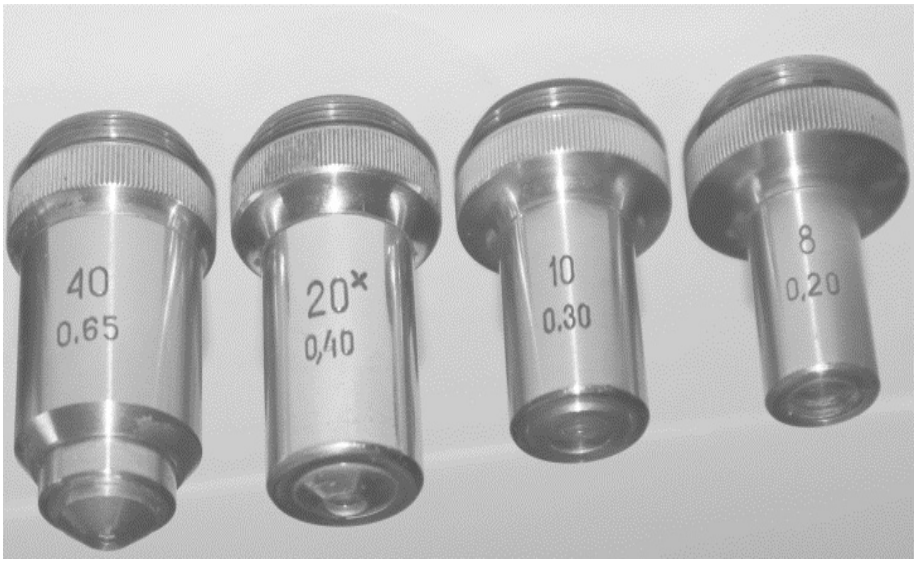

Рис. 1. Маркировка отечественных микрообъективов ЛОМО

Fig. 1. Labeling of domestic LOMO micro lenses

В табл. 1 показано разрешение объективов при длине волны источника освещения $\lambda = 0,6$ мкм.

Таблица 1

Table 1

Разрешение при использовании объективов ЛОМО

Resolution when using LOMO lenses

Увеличение объектива	Числовая апертура NA^{obj}	Resolution when using LOMO lenses
8x	0,2	1,830 мкм
10x	0,3	1,22 мкм
20x	0,4	0,915 мкм
40x	0,65	0,563 мкм

Увеличение пространственного разрешения в оптической микроскопии является давно и широко обсуждаемой проблемой [3–14].

В статье предлагается новый поход к увеличению пространственного разрешения микрообъективов с помощью субпиксельного сканирования формируемого им оптического изображения. Шаг сканирования выбирается в зависимости от требуемого увеличения пространственного разрешения и составляет величину меньшую, чем один элемент разрешения фотоматрицы, регистристрирующей оптическое изображение.

В [3–5] рассмотрена реализация субпиксельного сканирования одномерного сигнала. На рис. 2 показана схема субпиксельного сканирования одномерного сигнала.

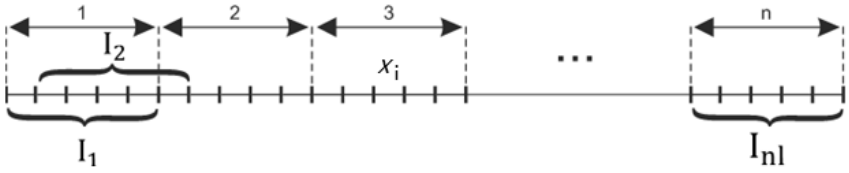

Рис. 2. Схема субпиксельного сканирования одномерного сигнала

Fig. 2. Scheme of subpixel scanning of one-dimensional signal

На рис. 2 n – количество элементов в строке фотоматрицы; l – число шагов субпиксельного сканирования, приходящихся на один элемент фотоматрицы; I_1 и I_2 – отдельный элемент фотоматрицы (интегрирующая апертура) до и после субпиксельного сдвига соответственно; I_i, $i = 0\ldots n$, nl – количество элементов x_i, содержащихся в формируемом изображении с высоким разрешением. В [7–10] показан процесс двухмерного субпиксельного сканирования. На рис. 3 выделенные более темным фоном элементы $A(x, y)$ исходного изображения с низким разрешением дополняются элементами изображения $AX(x, y)$ и $AXY(x, y)$ после субпиксельных сдвигов на величины, кратные сдвигам dx и dy соответственно.

A(x0,y0)	AXY(x0+dx,y0)	AXY(x0+2dx,·y0)	A(x1,·y0)	..
AXY(x0,·y0+dy)	AXY(x0+dx,y0+dy)	AXY(x0+2dx,y0+dy)	AXY(x1,·y0+dy	..
AXY(x0,·y0+2dy	AXY(x0+dx,y0+2dy)	AXY(x0+2dx,y0+2dy'	AX(x1,·y0+2dy]	..
A(x0,·y1)	AX(x0+dx,y1)	AX(x0+2dy,y1)	A(x1,·y1)	..
...	...	...	...	..

Рис. 3. Формирование изображения с высоким разрешением

Fig. 3. High-resolution imaging

Совокупность элементов изображения с высоким разрешением x_i и интегрирующие их элементы I_i с низким разрешением образуют систему линейных алгебраических уравнений [6, 7]:

$$\begin{aligned} &x_1 + x_2 + \ldots x_i = I_1, \\ &x_2 + x_3 + \ldots x_{i+1} = I_2, \\ &\ldots \\ &x_{(n-1)l+1} + x_{(n-1)l+2} + \ldots x_{nl} = I_{nl}. \end{aligned} \tag{2}$$

Таким образом, решая систему уравнений (2), можно синтезировать изображение в более высоком разрешении.

Дискретный спектр синтезированного таким образом изображения можно представить как

$$F_{\tau,\Delta x}(\omega) = \left(\left[\Im(f(x)) \otimes sinc\left(\frac{\omega N}{2} \right) \right] \cdot \Im(rect_\tau(x)) \right), \tag{3}$$

где $\left[\Im(f(x)) \otimes sinc\left(\frac{\omega N}{2} \right) \right]$ – фурье-образ синтезированного изображения; $\Im(rect_\tau(x))$ – фурье-образ апертуры (апертурная функция).

Из выражения (2) следует, что поэлементным делением фурье-образа синтезированного изображения на фурье-образ $\Im(rect_\tau(x))$ можно получить фурье-образ изображения с высоким разрешением. Обратное фурье-преобразование восстанавливает изображение $f(x)$, имеющее высокое разрешение [7].

Целью статьи является исследование возможности практической реализации предлагаемого подхода.

1. МОДИФИЦИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Для реализации субпиксельных сдвигов была проведена модификация металлографического агрегатного микроскопа МЕТАМ-Р1 [15]. В качестве предметного столика использован плоскопараллельный сканирующий пьезостолик Ratis XYZ_(H) [16]. Использование этого столика позволило обеспечить диапазон перемещения в области *XY* – 100 мм с минимальным шагом перемещения 1 нм. Для дискретизации изображений использовалась серийная цифровая беззеркальная камера Canon EOS M50 с CMOS-матрицей APS-C разрешением 24,1 мегапикселя (6000 × 4000 пикселей / 3,7 × 3,7 мкм). Матрица имеет размер 22,3 × 14,9 мм. Связь микроскопа с ЭВМ осуществляется через USB-порт.

Внешний вид модифицированного оптического микроскопа показан на рис. 4.

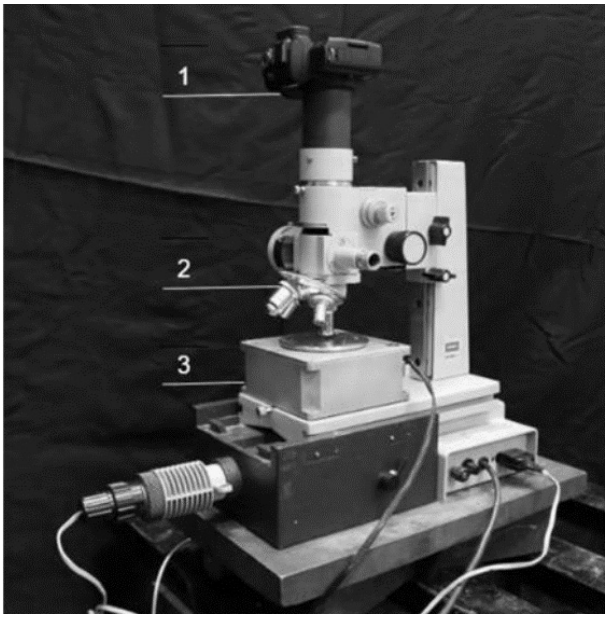

Рис. 4. Модифицированный оптический микроскоп:

1 – цифровой фотоаппарат; *2* – оптический микроскоп МЕТАМ-Р1; *3* – управляемый предметный столик

Fig. 4. Modified optical microscope:

1 is a digital camera; *2* is the METAM-R1 optical microscope; *3* is a controlled position table)

Для увеличения разрешения в два раза использовалась схема движения предметного столика, показанная на рис. 5. Необходимо сделать всего три шага: два по горизонтали и один по вертикали. При этом регистрируется четыре изображения исследуемого объекта: одно – для неподвижного положения предметного столика и три – в сдвинутых положениях соответственно.

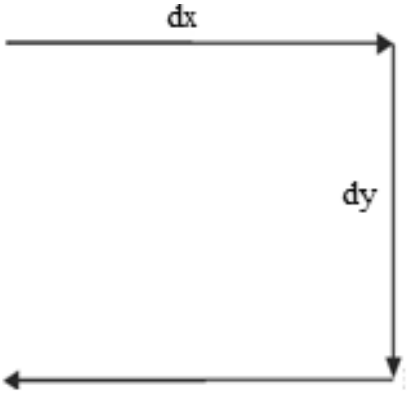

Рис. 5. Траектория субпиксельного сканирования

Fig. 5. Subpixel scanning trajectory

2. СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТОДОМ СУБПИКСЕЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Числовая апертура микробъектива определяет его поле зрения. В табл. 2 показано максимальное поле зрения в модифицированном микроскопе.

Таблица 2

Table 2

Поле зрения при использовании различных микрообъективов

Field of view with different micro lenses

Увеличение объектива	Числовая апертура NA^{obj}	Поле зрения (мм)
8x	0,2	2,417
0x	0,3	2,019
20x	0,4	1,075
40x	0,65	0,541

На рис. 6 показано сравнение поля зрения для двух микрообъективов 8x и 20x.

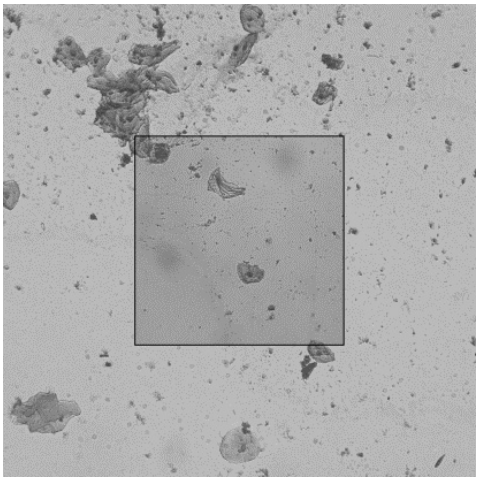

Рис. 6. Поле зрения объектива 8x и 20x

Fig. 6. Lens field of the view 8x and 20x

Из табл. 2 видно, что разрешение для микрообъектива кратностью 8x составило 1,830 мкм, а для микрообъектива кратностью 20x – 915 нм.

С объективом 8x сканировалось 4 изображения объекта с субпиксельным сдвигом 915 нм, они объединялись по схеме, показанной на рис. 7. То есть один пиксель результирующего изображения формируется из четырех пикселей с низким разрешением. Размер области изображения выбирался так, чтобы он совпадал с полем зрения объектива кратностью 20x и составил 1024 пикселя.

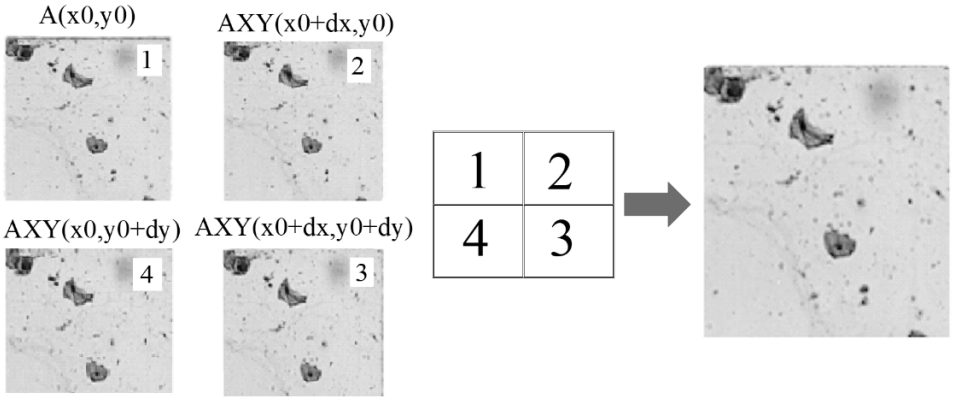

Рис. 7. Синтез изображения с высоким разрешением

Fig. 7. High resolution image synthesis

Таким образом, из четырех изображений размером 1024 × 1024 пикселя сформировано изображение размером 2048 × 2048 пикселей. Для сравнения полученного изображения с изображением, полученным с микрообъективом кратностью 20x, сканировалось это же изображение с таким же количеством пикселей (2048 × 2048). После этого в соответствии с выражением (3) были определены фурье-образы апертурной функции $\Im(rect_\tau(x))$ и изображений с высоким и низким разрешением [7, 8]. Затем фурье-образ изображения,

синтезированного из четырех изображений, полученных с микрообъективом кратностью 8х, делился поточечно на фурье-образ изображения, сканированного объективом с кратностью 20х. На рис. 8 показан вид апертурной функции объектива 20х (2048 × 2048 точек).

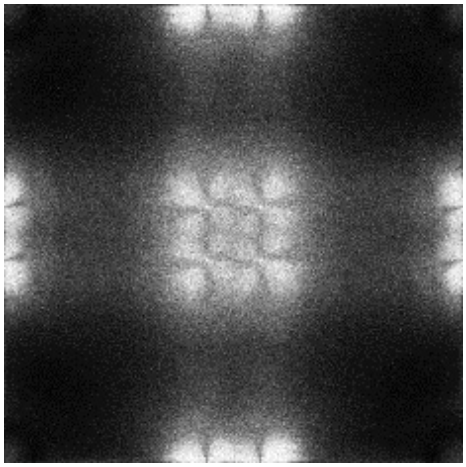

Рис. 8. Апертурная функция, соответствующая объективу 20х (2048 × 2048 точек)

Fig. 8. Aperture function corresponding to 20x lenses (2048 × 2048 pixels)

Вычисление апертурной функции проводилось для других участков образца и для других образцов. Установлено, что вид апертурной функции зависит только от используемых микрообъективов. На рис. 9 показаны различные участки изображения, полученные с микрообъективами кратностью 8х и 20х (слева и справа соответственно).

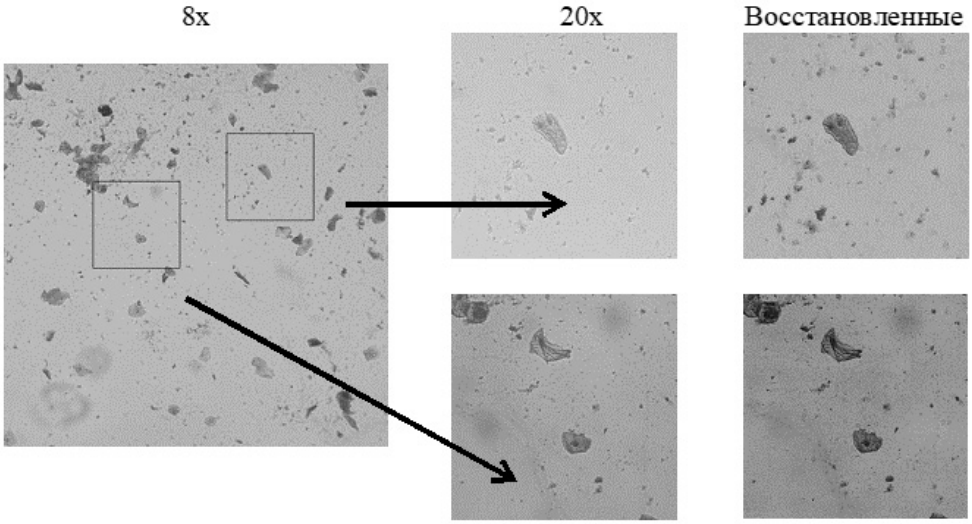

Рис. 9. Изображения, полученные микрообъективами различной кратности

Fig. 9. Images obtained with micro lenses of various magnifications

Сравнение участков поля зрения восстановленного изображения из серии изображений с объективом 10х показало полную идентичность с изображением тех же участков, полученным с объективом 20х.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье экспериментально показана возможность синтеза изображения с высоким разрешением с помощью субпиксельного сканирования. Отличительной способностью реализованного подхода является введение апертурной функции микрообъектива по серии из четырех изображений, полученных при перемещении объектного столика на 915 нм с объективом 8х. Таким образом, если определена апертурная функции для серии объективов с малым пространственным разрешением, то использовать объективы с большим разрешением необязательно. И хотя для простоты реализации использовались 8- и 20-кратные объективы, предлагаемый подход может быть использован для объективов с другой кратностью увеличения, в том числе и иммерсионных. Отметим, что такой подход позволяет для низкократных микрообъективов получить такое же пространственное разрешение, как и у микрообъективов с высоким разрешением, сохраняя при этом широкое поле зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградова Г.Н., Захаров В.В.* Основы микроскопии. Ч. 1. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 133 с.

2. Виноградова Г.Н., Захаров В.В. Основы микроскопии. Ч. 2. – СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 248 с.

3. *Васьков С.Т., Ефимов В.М., Резник А.Л.* Быстрая цифровая реконструкция сигналов и изображений по критерию минимума энергии // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 13–20.

4. *Белов А.М., Денисова А.Ю.* Спектральное и пространственное сверхразрешение при комплексировании данных ДЗЗ различных источников // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 855–863. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-855-863.

5. Оценка ошибок синтеза изображений с суперразрешением на основе использования нескольких кадров / А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, К.В. Коротков, Е.П. Новичихин // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 701–711. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-701-711.

6. *Королев А.Н.* Повышение разрешающей способности оптических систем путем эффективного использования степеней свободы волнового поля объекта // Успехи физических наук. – 1968. – Т. 96, № 2. – С. 261–289.

7. *Гужов В.И., Марченко И.О., Трубилина Е.Е.* Повышение пространственного разрешения сигналов в оптических системах // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 65–70. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-924.

8. *Гужов В.И., Трубилина Е.Е., Марченко И.О.* Восстановление сигналов по дискретным значениям с ограниченным числом идеальных отсчетов // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 147–156. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-147-156.

9. *Попов М.А., Станкувич С.А., Шкляр С.В.* Алгоритм повышения разрешения субпиксельно смещенных изображений // Математичні машини і системи. – 2015. – № 1. – С. 29–36.

10. *Гужов В.И., Ильиных С.П., Марченко И.О.* Метод повышения пространственного разрешения в цифровой голографической микроскопии // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 104–110. –DOI: 10.15372/AUT20180313.

11. Superresolved imaging based on wavelength multiplexing of projected unknown speckle patterns / O. Wagner, A. Schwarz, A. Shemer, C. Ferreira, J. Garcia, Z. Zalevsky // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54 (13). – P. D51–D60.

12. *Турухано Б.Г., Турухано И.А., Турухано Н.* Высокоразрешающий цифровой голографический микроскоп для отражающих объектов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 3. – С. 10–15. – DOI: 10.25791/pribor.3.2021.1244.

13. *Блажевич С.В., Селютина Е.С.* Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. – 2014. – № 5 (176). – С. 186–190.

14. Исследование фокусировки в близкорасположенные световые пятна при освещении дифракционных оптических элементов коротким импульсным лазерным пучком / С.Н. Хонина, С.А. Дегтярев, А.П. Порфирьев, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев, А.С. Ларькин, А.Б. Савельев-Трофимов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 187–196.

15. Микроскоп металлографический агрегатный METAM-P1. – URL: https://scopica.ru/proj/mikroskop-metallograficheskiy-agregatnyiy-metam-r1 (дата обращения: 28.11.2024).

16. Ratis XYZ_H – трехкоординатный плоскопараллельный сканер. – URL: http://www.nanoscantech.com/ru/products/stage/stage-100.html (дата обращения: 28.11.2024).

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Автор 290 научных работ, в том числе обладатель четырех патентов. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, высокоточные измерения, программная инженерия. E-mail: vigguzhov@gmail.com

Ильиных Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Автор более 180 научных работ, в том числе учебника НГТУ и четырех патентов. Область научных интересов – разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах. E-mail: isp51@yandex.ru

Андрющенко Екатерина Вадимовна, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Специальность 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения». Область научных интересов – повышение разрешения оптических систем. E-mail: andrushenkokv@gmail.com

Guzhov Vladimir I., professor at the Department of Data Acquisition and Processing Systems, Novosibirsk State Technical University, D.Sc./ (Eng.). He is the author of 290 scientific works, including 4 patents. His research interests include information-measuring systems, high-precision measurements, and software engineering. E-mail: vigguzhov@gmail.com

Iliinykh Sergey P., professor at the Department of Computer Science, Novosibirsk State Technical University, D.Sc. (Eng.). He is the author of more than 180 scientific works, including the textbook of NSTU and 4 patents. His research interests cover development of algorithms for image analysis in optical measurement systems. E-mail: isp51@yandex.ru

Andryushchenko Ekaterina V., post-graduate student in Novosibirsk State Technical University. She specializes in the field . "Devices, systems and medical devices". Her research interests include increasing the resolution of optical microscopy based on spatial subpixel shifts. E-mail: andrushenkokv@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-4-47-58

Increasing spatial resolution in optical microscopy systems using low-magnification micro lenses[*]

V.I. GUZHOV[a], *S.P. ILINYKH*[b], *E.V. ANDRYUSHCHENKO*[c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *vigguzhov@gmail* [b] *isp51@yandex.ru* [c] *andrushenkokv@gmail.com*

Abstract

Optical microscopy systems are an important research method in many medical and industrial applications. Spatial resolution depends on the design of the objective lens and the field of view narrows as magnification increases. As the resolution increases, the field of view narrows. The maximum field of view is achieved with lenses with low magnification ratio and correspondingly low spatial resolution. Lenses with low resolution are structurally simple to manufacture and therefore inexpensive. Therefore, the use of such lenses to increase spatial resolution is a promising direction.

The purpose of this work is to investigate the possibility of increasing the spatial resolution of optical microscopy systems using micro-lenses with a low magnification ratio while maintaining their inherent wide field of view. Improvement of spatial resolution is realized with the help of the approach proposed in the paper based on the technology of subpixel scanning and introduction of aperture function independent of the image properties. In this case, the spectrum of the image synthesized with the help of subpixel scanning technology is compensated by the multiplier of the proposed aperture function, the type of which depends only on the type of lens aperture and does not depend on the properties of the object under study. For realization of subpixel shift scanning the modification of the slide of metallographic aggregate microscope METAM-R1 was carried out. The two-coordinate stage can be positioned with high accuracy under computer control. The obtained experimental results show the realizability of the proposed approach.

The disadvantage of the proposed approach is the necessity to use an additional subpixel shift system. However, in many cases the use of subpixel shifts is more preferable than the use of complex lenses with high resolution and small field of view.

Keywords: microscopy, Fourier transform, Fourier image, spectrum, super-resolution, sub-pixel scanning, micro lens, field of view, magnification ratio, photomatrix, pixel

REFERENCES

1. Vinogradova G.N., Zakharov V.V. *Osnovy mikroskopii*. Ch. 1 [Fundamentals of Microscopy. Pt. 1]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2018. 133 p.

2. Vinogradova G.N., Zakharov V.V. *Osnovy mikroskopii*. Ch. 2 [Fundamentals of Microscopy. Pt. 2]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2020. 248 p.

3. Vas'kov S.T., Efimov V.M., Reznik A.L. Fast digital image and signal reconstruction by the minimum energy criterion. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2003, iss. 4, pp. 11–17. Translated from *Avtometriya*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 13–20.

4. Belov A.M., Denisova A.Y. Spektral'noe i prostranstvennoe sverkhrazreshenie pri kompleksirovanii dannykh DZZ razlichnykh istochnikov [Spectral and spatial super-resolution method for Earth remote sensing image fusion]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2018, vol. 42, no. 5, pp. 855–863. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-855-863.

5. Kokoshkin A.V., Korotkov V.A., Korotkov K.V., Novichikhin E.P. Otsenka oshibok sinteza izobrazhenii s superrazresheniem na osnove ispol'zovaniya neskol'kikh kadrov [Estimation of super-resolution imaging errors based on the use of multiple frames]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2017, vol. 41, no. 5, pp. 701–711. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-701-711.

6. Korolev A.N. Increase of resolution of optical systems by effective use of the degrees of freedom on the object wave field. *Soviet Physics Uspekhi*, 1969, vol. 11 (5), pp. 712–726. DOI: 10.1070/PU1969v011n05ABEH003743. Translated from *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1968, vol. 96, no. 2, pp. 261–289.

[*] *Received 22 November 2024.*

The work was carried out with the financial support of the RSF grant 24-29-00006.

7. Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E. Povyshenie prostranstvennogo razresheniya signalov v opticheskikh sistemakh [Increasing the spatial resolution of signals in optical systems]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2022, vol. 46, no. 1, pp. 65–70. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-924.

8. Guzhov V.I., Trubilina E.E., Marchenko I.O. Vosstanovlenie signalov po diskretnym znacheniyam s ogranichennym chislom ideal'nykh otschetov [Signal recovery with a limited number of ideal discrete samples]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 147–156. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-147-156.

9. Popov M.A., Stankuvich S.A., Shklyar S.V. Algoritm povysheniya razresheniya subpiksel'no smeshchennykh izobrazhenii [Algorithm for increasing the resolution of subpixel-shifted images] // *Matematichni mashini i sistemi = Mathematical Machines and Systems*, 2015, no. 1, pp. 29–36.

10. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Marchenko I.O. Method of increasing the spatial resolution in digital holographic microscopy. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, vol. 54 (3), pp. 301–306. DOI: 10.3103/S8756699018030135. Translated from *Avtometriya*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 104–110. DOI: 10.15372/AUT20180313.

11. Wagner O., Schwarz A., Shemer A., Ferreira C., Garcia J., Zalevsky Z. Superresolved imaging based on wavelength multiplexing of projected unknown speckle patterns. *Applied Optics*, 2015, vol. 54 (13), pp. D51–D60.

12. Turukhano B.G., Turukhano I.A., Turukhano N. Vysokorazreshayushchii tsifrovoi golograficheskii mikroskop dlya otrazhayushchikh ob"ektov [High resolution digital holographic microscope for reflective objects]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 3, pp. 10–15. DOI: 10.25791/pribor.3.2021.1244.

13. Blazhevich S.V., Selyutina E.S. Povyshenie razresheniya tsifrovogo izobrazheniya s ispol'zovaniem subpiksel'nogo skanirovaniya [Sub-pixel scanning to produce super-resolution digital images]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika = Belgorod state university scientific bulletin. Mathematics. Physics*, 2014, no. 5 (176), pp. 186–190.

14. Khonina S.N., Degtyarev S.A., Porfirev A.P., Moiseev O.Yu., Poletaev S.D., Larkin A.S., Savelyev-Trofimov A.B. Issledovanie fokusirovki v blizkoraspolozhennye svetovye pyatna pri osveshchenii difraktsionnykh opticheskikh elementov korotkim impul'snym lazernym puchkom [Study of focusing into closely spaced spots at illuminating diffractive optical element by short pulse laser beam]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2015, vol. 39, no. 2, pp. 187–196.

15. *Mikroskop metallograficheskii agregatnyi METAM-R1* [Metallographic aggregate microscope METAM-R1]. Available at: https://scopica.ru/proj/mikroskop-metallograficheskiy-agregatnyiy-metam-r1 (accessed 28.11.2024).

16. *Ratis XYZ_H – trekhkoordinatnyi ploskoparallel'nyi skaner* [Ratis XYZ_H – 3D plane-parallel nano piezo scanning stage with central hole for optical applications]. Available at: http://www.nanoscantech.com/ru/products/stage/stage-100.html (accessed 28.11.2024).

Для цитирования:

Гужов В.И., Ильиных С.П., Андрющенко Е.В. Увеличение пространственного разрешения в системах оптической микроскопии при использовании микрообъективов малой кратности // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 4 (96). – С. 47–58. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-4-47-58.

For citation:

Guzhov V.I.., Ilinykh S.P., Andryushchenko E.V. Uvelichenie prostranstvennogo razresheniya v sistemakh opticheskoi mikroskopii pri ispol'zovanii mikroob"ektivov maloi kratnosti [Increased spatial resolution in optical microscopy systems using low-magnification micro lenses, pixel]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 4 (96), pp. 47–58. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-4-47-58.