

Экспериментальная оценка определения среднего размера спеклов

Сергеев Р.Н. 

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация; romanstr@yandex.ru;

Поступила: 11.09.2024

Рассмотрена: 27.10.2024

Принята: 25.11.2024

Аннотация. В работе предлагается способ оценки среднего размера спекла по экспериментально зафиксированным изображениям спекл-полей на КМОП-матрице. Данный способ может быть полезен при использовании в методах спекл-интерферометрии при определении их метрологических параметров.

Ключевые слова: спекл-поле; средний размер спекла; КМОП-матрица; бинаризация; сегментация.

Научная статья



Введение

Явление возникновения спеклов это интерференционное явление, которое возникает, когда диффузно-рассеивающий объект отражает или пропускает когерентное освещение [1]. Применение спекл-структур, образующихся в плоскости изображения, составляет основу методов спекл-интерферометрии и спекл-фотографии.

Свойства спекл-картин зависят от способа их образования. Существует два типа наблюдения спеклов, терминология которых введена еще Д. Габором, субъективные спеклы, наблюдаемые в фокальной плоскости оптической системы, и объективные спеклы, наблюдаемые на определенном расстоянии от диффузно-рассеивающего объекта.

Одним из важных параметров спекл-картин является средний поперечный размер спекла. Как правило, для оценки поперечного размера спеклов используют функцию автокорреляции поля интенсивности из предположения о том, что спекл-поле имеет гауссовскую статистику распределения [2–5].

Применение такой оценки недостаточно при практическом использовании оптических методов измерений, когда средний размер спеклов определяет их чувствительность и диапазоны измерений. Поэтому авторами разных работ проводятся исследования по определению поперечного размера спеклов [3; 6; 7].

В данной работе предлагаются алгоритм программы и апробация оценки поперечного размера спеклов экспериментально регистрируемой цифровой камерой изображений субъективных спекл-полей, получаемых различными оптическими системами. Алгоритм может применяться непосредственно перед проведением измерений, способствуя выбору оптимальных метрологических характеристик используемой измерительной системы.

1. Алгоритм оценки среднего поперечного размера спекла

Суть предлагаемого алгоритма состоит в сравнении спекла с известным размером пикселя КМОП-матрицы. Таким образом, изображение спекла, зафиксированное КМОП-матрицей, будет определять некоторую фигуру с определенной площадью, кратной площади пикселя. Исходя из площади фигуры, занимаемой спеклом, можно определить характерный диаметр окружности с соответствующей площадью, который и будет искомым средним поперечным размером спекла.

На рисунке 1 представлены характерные картины зарегистрированных изображений субъективных спекл-полей с различными апертурами оптической системы: круглой и кольцевых с соотношением диаметров внутреннего к внешнему $\varepsilon = 0,8$ и $0,9$. В силу малости размеров спеклов для возможности их наблюдения на рисунке 1 представлены вырезанные участки из левого верхнего угла изображений с целым размером 2592×1944 пикселей. Из нее видны хаотическое расположение и форма спеклов.

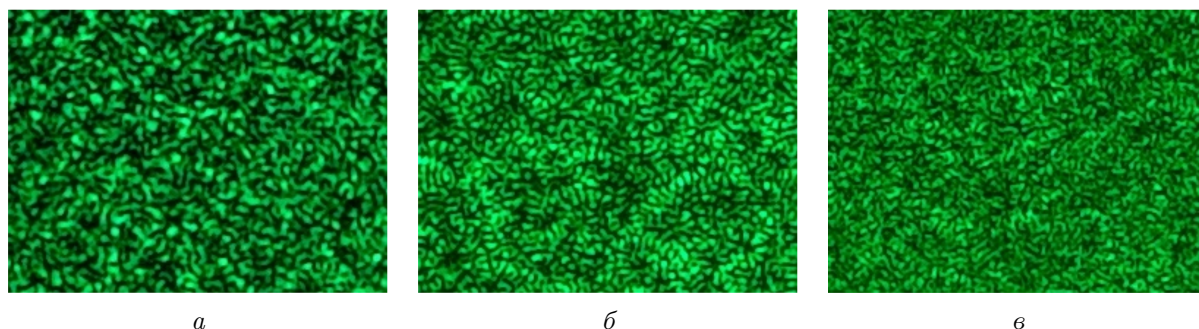


Рис. 1. Характерные спекл-изображения: а) для открытой апертуры; для кольцевых апертур с б) 0,8 и в) 0,9 при одинаковом увеличении

Fig. 1. Typical speckle patterns: a) for an open aperture; for annular apertures with б) 0.8 and в) 0.9 at the same magnification

Для определения площади спекла необходимо определить его границы, т. е. выделить контур с одинаковой внутри него яркостью. В компьютерном зрении для задач, где изображение предмета имеет одномерную яркость, применяют бинаризацию изображений, разделяя диапазон яркости пополам [8; 9].

Изображение, регистрируемое камерой, цветное поэтому для применения порога яркости для бинаризации необходимо преобразовать изображение в массив яркости. В настоящее время широко используется представление цифрового изображения в колориметрической системе RGB, в данной системе используется три компонента цвета красного (R), зеленого (G) и синего (B). Поэтому прежде, чем произвести бинаризацию, цветное изображение спекл-поля преобразуется из колориметрической системы RGB. Известно, что яркость отдельного пикселя можно определить в соответствии с выражением [9]:

$$L(x, y) = R(x, y) + 4,5907G(x, y) + 0,0601B(x, y), \quad (1)$$

где $R(x, y), G(x, y), B(x, y)$ — цветовая составляющая пикселя.

В полученном массиве яркости производится поиск максимума, минимума, а также определяется среднее значение яркости по всему ансамблю координат пикселей. Преобразованное изображение спекл-поля сохраняется и используется дальше для сегментирования спеклов.

На основе полученных данных производится бинаризация изображения. Создается двумерный массив, равный исходному изображению, в котором пиксели на цветном изображении, имевшие высокую яркость, превышающую установленный порог, представляются темными, а остальные — светлыми. В силу того что размеры спеклов сопоставимы с размером пикселей, резкое изменение яркости на границе может приводить к частичной потере информации в виде неточного получения границы спекла. На рисунке 2 представлены некоторые возможные случаи яркости спеклов.

В случае, показанном на рисунке 2, а, при бинаризации произойдет потеря информации, т. к. яркость спекла ниже пороговой. Когда яркость спекла высокая, происходит перенасыщение КМОП-матрицы (рис. 2, б), в таком случае определение контура произойдет с искажением формы. Оптимальным условием будет, если яркость спекла выше пороговой, но ниже максимальной (рис. 2, в). Кроме того, КМОП-матрица может иметь изначальное насыщение, связанное с высокой интенсивностью освещения объекта исследования, приводя к появлению фона (рис. 2, г). В данном случае определим минимальное значение яркости (которое будет

отлично от нуля) и проведем его попиксельное вычитание из всего массива. Пример результата бинаризации изображений на рисунке 1 в соответствии с описанным алгоритмом приведен на рисунке 3.

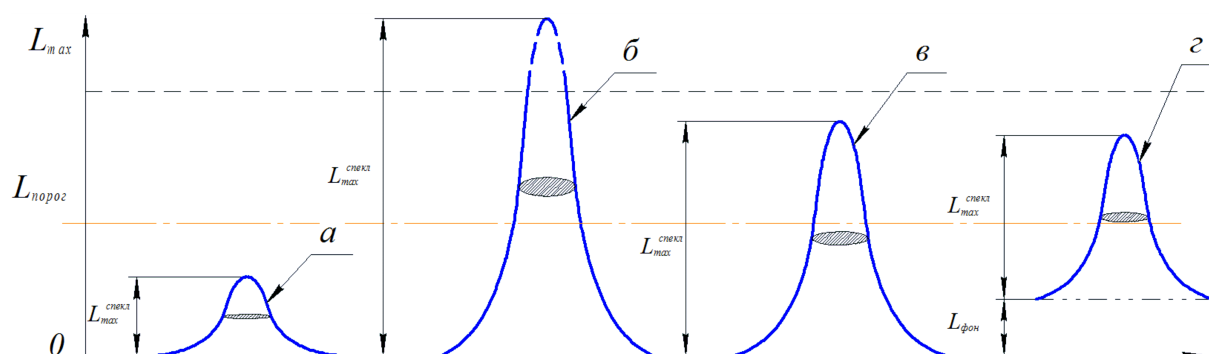


Рис. 2. Схематичное представление яркости светлых спеклов на цифровом изображении

Fig. 2. Schematic representation of the brightness of light speckles in a digital image

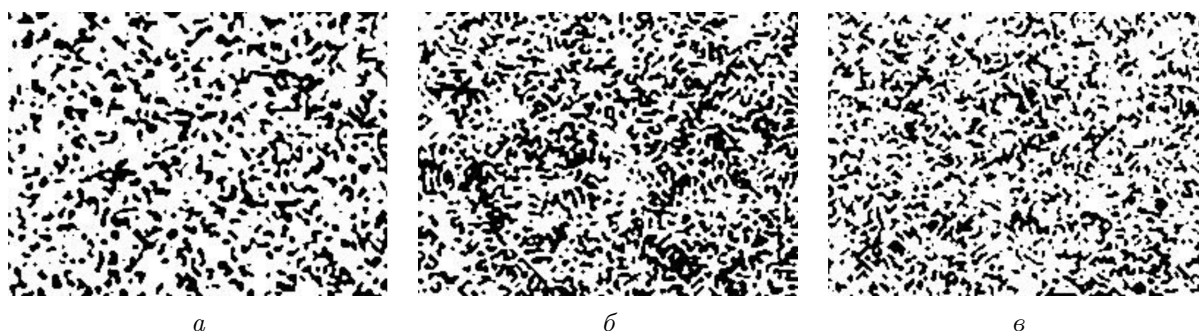


Рис. 3. Характерный вид бинаризованных спекл-изображений: а) для открытой апертуры; для кольцевых апертур с б) 0,8 и в) 0,9

Fig. 3. Typical appearance of binarized speckle patterns: a) for an open aperture; for annular apertures with b) 0.8 and v) 0.9

Сегментация контуров на бинаризованном изображении производится с помощью функций библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV [10]. Существующая функция библиотеки OpenCV производит поиск связанных компонент бинарного изображения, получая на выходе размеченную карту пикселей, в которой ненулевые пиксели, принадлежащие одной связной компоненте, получают одинаковые метки [10; 11]. Таким образом, обрабатывая уже связанные компоненты, создаем массив, в котором находятся их площади в пикселях, а размер массива будет соответствовать их количеству. Далее производится статистическая обработка массива.

Описанный алгоритм реализован в едином приложении FindeSizeSpeckle.py, а также модуле, содержащем используемые функции SpeckleSizeModule.py на языке программирования Python [12].

2. Экспериментальная апробация алгоритма

Апробация алгоритма проводилась на экспериментально зарегистрированных изображениях субъективных спеклов. Схема записи субъективных спеклов состояла из когерентно освещенной матовой пластины, являющейся частью специального устройства, позволяющего автоматически перемещать пластину в плоскости изображения. Оптическая система состояла из

формирующей линзы апертурой 50 мм и фокусным расстоянием 480 мм, а также трех вариантов диафрагм: круглой и кольцевых с соотношением диаметров внутреннего к внешнему $\varepsilon = 0,8$ и $0,9$ (диаметр внешнего кольца 50 мм). Матовая пластина и плоскость КМОП-матрицы размещались на расстоянии $2f$, что обеспечивало оптическое увеличение, равное 1. Запись осуществлялась на КМОП-матрицу Eakins 5.0MP USB Digital Microscope Camera с разрешением 2592×1944 пикселей и размером пикселя $2,2 \text{ мкм} \times 2,2 \text{ мкм}$. Источником когерентного света служил лазер LCS-DTL-317 с длиной волны 532 мкм и максимальной мощностью 52,6 мВт.

В силу того что интенсивность освещения оказывает влияние на вид формируемого спекл-поля, было проведено исследование влияния мощности освещения лазером. Для каждого уровня мощности лазера проводился набор 15 изображений спекл-полей, смещенных друг относительно друга на 2,5 мкм.

Результат влияния мощности лазера на осредненную яркость по всему изображению, полученную по ансамблю из 15 изображений для трех вариантов апертур, представлен на рисунке 4.

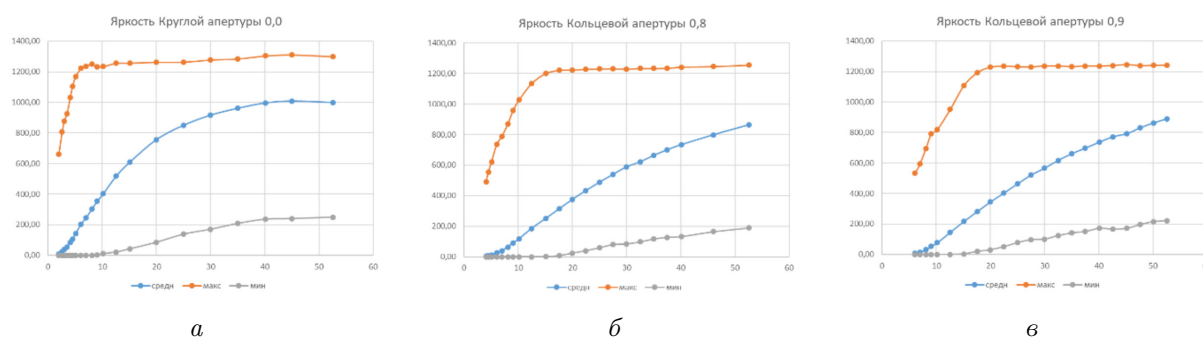


Рис. 4. График изменения средней яркости изображений от мощности лазера для круглой а) и кольцевых б), в) апертур

Fig. 4. Graph of the change in average image brightness from laser power for circular a) and annular б), в) apertures

Из рисунка 4 видно, что при мощности освещения больше 10 мВт начинает расти минимальная яркость изображений. Это говорит о снижении контраста изображений в целом. Для снижения этого эффекта при бинаризации предусмотрено вычитание значения соответствующей минимальной яркости. Рост максимальной яркости происходит до значений мощности лазера для круглой апертуры (0,0)–8,1 мВт, кольцевой (0,8)–17,6 мВт, (0,9)–20,0 мВт, что справедливо т. к. у кольцевых апертур площадь входного зрачка меньше.

На рисунке 5 представлены характерные гистограммы изображений спекл-поля при мощности источника освещения 15 мВт и кольцевой апертуры с $\varepsilon=0,8$.

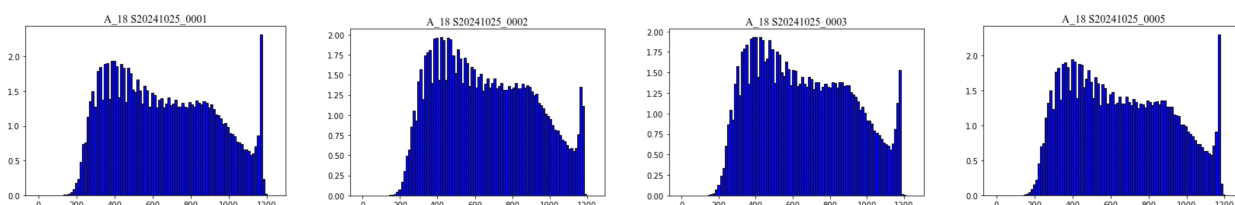


Рис. 5. Характерное изменение яркости пикселей при смещении диффузной матовой пластины в плоскости изображения

Fig. 5. Characteristic change in pixel brightness when shifting the diffuse matte plate in the image plane

Из рисунка 5 видно, что смещение не приводит к серьезному изменению функции распределения яркости.

На рисунке 6 показаны гистограммы распределения частот яркости пикселей при разных уровнях мощности освещения и различных апертурах.

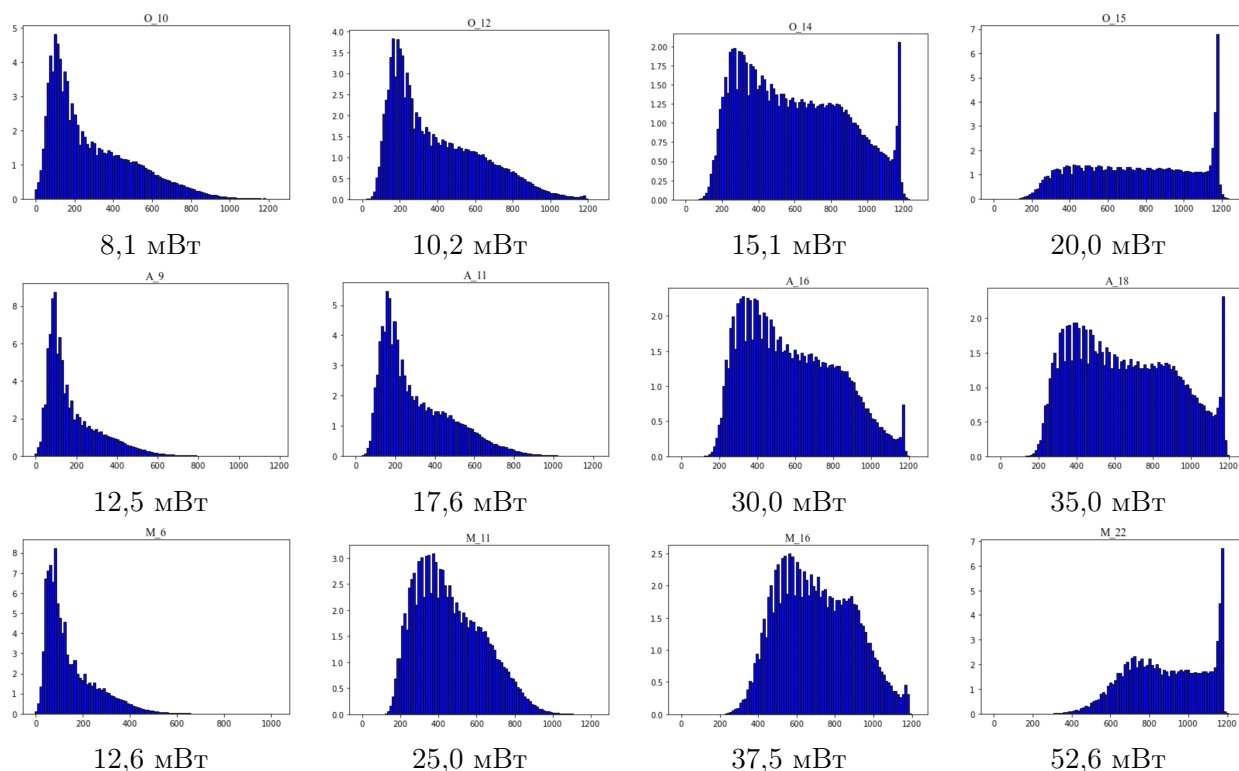


Рис. 6. Гистограмма распределения яркости при круглой апертуре (верхний ряд); кольцевой апертуре $\varepsilon = 0,8$ (средний ряд), $\varepsilon = 0,9$ (нижний ряд)

Fig. 6. Histogram of brightness distribution for a circular aperture (top row); annular aperture $\varepsilon = 0,8$ (middle row), $\varepsilon = 0,9$ (bottom row)

Из рисунка 6 видно, что частота яркости пикселей меняется с увеличением мощности освещения и при некотором значении имеет вид, приближенный к нормальному закону распределения случайной величины. Степень корреляция функции частоты яркости пикселей с нормальным законом может выступать в качестве критерия для сравнения средних размеров спеклов при различных апертурах оптической системы.

Необходимость выбора данного критерия обусловлена тем, что существует влияние на размер спекла уровня яркости [6]. На рисунке 7 построен график зависимости среднего размера спекла от уровня мощности освещения.

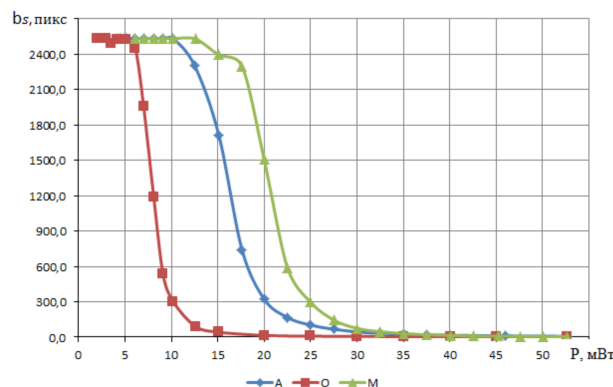


Рис. 7. График изменения поперечного размера спекла от мощности освещения лазером для круглой апертуры (O), кольцевой с $\varepsilon = 0,8$ (A), кольцевой с $\varepsilon = 0,9$ (M)

Fig. 7. Graph of the change in the average transverse size of the speckle from the laser illumination power for a circular aperture (O), annular with $\varepsilon = 0,8$ (A), annular with $\varepsilon = 0,9$ (M)

Результат получен при помощи разработанного алгоритма. Осреднение проводилось по ансамблю из 15 изображений. Из рисунка 7 видно, что линейный участок изменения размера спекла находится в диапазоне для круглой апертуры от 6,1...10,2 мВт, для кольцевых (0,8) от 12,5...20 мВт, (0,9) от 17,6...25 мВт.

Заключение

Разработанный алгоритм программы и проведенная апробация оценки среднего размера спеклов позволяет непосредственно в условиях экспериментальных исследований вычислять средний размер спеклов, тем самым определяя оптимальные метрологические характеристики измерительной оптической системы в спекл-интерферометрии. Способ применим к любым методам спекл-интерферометрии.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-10066.

Информация о конфликте интересов: автор и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

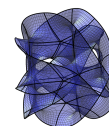
Цитирование. Сергеев Р.Н. Экспериментальная оценка определения среднего размера спеклов // Вестник Самарского университета. Естественная серия / Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2024. Т. 30, № 4. С. 84–91. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-84-91.

© Сергеев Р.Н., 2024

Роман Николаевич Сергеев (romansr@yandex.ru) – старший преподаватель кафедры математического моделирования в механике, инженер НИИ-201 (Институт акустики машин), Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Литература

- [1] Франсон М. Оптика спеклов. Москва: Мир, 1980. 172 с. URL: <https://libcats.org/book/438857>.
- [2] Dainty J.C. Laser Speckle and Related Phenomena. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg GmbH, 1975. 288 p. URL: <https://iypt.ru/wp-content/uploads/2019/07/Topics-in-Applied-Physics-Volume-9.pdf>.
- [3] Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Englewood, Colorado: Roberts and Company Publishers, 2007. 387 p. URL: https://books.google.ru/books?id=MXAkngEACAAJ&redir_esc=y.
- [4] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 240 с. URL: <https://libcats.org/book/504837>.
- [5] Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. Москва: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1985. 224 с. URL: <https://djvu.online/file/9EmghZQLXqIX4>; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18898719>. EDN: <https://www.elibrary.ru/pxoowb>.
- [6] Марти Лопес Л. К определению поперечного размера спеклов // Журнал Технической Физики. 1991. Т. 61, вып. 8. С. 144–148. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/jtf4380>.



- [7] Alexander T.L., Harvey J.E., Weeks A.R. Average speckle size as a function of intensity threshold level: comparison of experimental measurements with theory // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, issue 35. P. 8240–8250. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.33.008240>.
- [8] Сальников И.И. Растровые пространственно-временные сигналы в системах анализа изображений. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 248 с. URL: <https://knigogid.ru/books/1918446-rastrovye-prostranstvenno-vremennye-signal-y-v-sistemah-analiza-izobrazheniy>.
- [9] Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 608 с. URL: <https://books.google.ru/books?id=ssYLMX5gLpC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>.
- [10] Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3. Москва: ДМК Пресс, 2017. 826 с.
- [11] Содем Я.Э. Программирование компьютерного зрения на языке Python. Москва: ДМК-Пресс, 2016. 312 с. URL: https://vk.com/wall-53449719_9798?ysclid=m5w8gnmmr1556769599.
- [12] Хилл К. Научное программирование на Python. Москва: ДМК Пресс, 2021. 646 с. URL: <https://www.rulit.me/author/hill-kristian/nauchnoe-programmirovaniye-na-python-download-677121.html>.

DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-84-91

Experimental assessment of determining the average size of speckles

Sergeev R.N. 

Samara National Research University, Samara, Russian Federation; romansr@yandex.ru;

Received: 11.09.2024

Revised: 27.10.2024

Accepted: 25.11.2024

Scientific article



Abstract. The paper proposes a method for estimating the average speckle size using experimentally recorded images of speckle fields on a CMOS matrix. This method can be useful when used in speckle interferometry methods when determining their metrological parameters.

Key words: speckle field; average speckle size; CMOS matrix; binarization; segmentation.

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-10066.

Information about the conflict of interests: the author and reviewers declared no conflicts of interest.

Citation. Sergeev R.N. Experimental assessment of determining the average size of speckles. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 84–91. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-84-91. (In Russ.)

© Sergeev R.N., 2024

Roman N. Sergeev (romansr@yandex.ru) – senior lecturer of the Department of Mathematical Modeling in Mechanics, engineer of NII-201 (Institute of Acoustics of Machines), Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, 443086, Russian Federation.

References

- [1] Franson M. Speckle Optics. Moscow: Mir, 1980, 172 p. Available at: <https://libcats.org/book/438857>. (In Russ.)
- [2] Dainty J.C. Laser Speckle and Related Phenomena. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg GmbH, 1975, 288 p. Available at: <https://iypt.ru/wp-content/uploads/2019/07/Topics-in-Applied-Physics-Volume-9.pdf>.
- [3] Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Englewood, Colorado: Roberts and Company Publishers, 2007, 387 p. Available at: https://books.google.ru/books?id=MXAkngEACAAJ&redir_esc=y.
- [4] Zeldovich B.Ya., Pilipetskiy N.F., Shkunov V.V. Wave Front Reversal. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1985, 240 p. Available at: <https://libcats.org/book/504837>. (In Russ.)
- [5] Klimenko I.S. Holography of focused images and speckle interferometry. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. lit., 1985, 224 p. Available at: <https://djvu.online/file/9EmghZQLXqIX4>; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18898719>. EDN: <https://www.elibrary.ru/pxoowb>. (In Russ.)
- [6] Lopez L.M. On determining the transverse size of speckles. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1991, vol. 61, issue 8, pp. 144–148. Available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A1991HJ93400022>. (In Russ.)
- [7] Alexander T.L., Harvey J.E., Weeks A.R. Average speckle size as a function of intensity threshold level: comparison of experimental measurements with theory. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, issue 35, pp. 8240–8250. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.33.008240>.
- [8] Salnikov I.I. Raster spatio-temporal signals in image analysis systems. Moscow: FIZMATLIT, 2009, 248 p. Available at: <https://knigogid.ru/books/1918446-rastrovye-prostranstvenno-vremennye-signaly-v-sistemah-analiza-izobrazheniy>. (In Russ.)
- [9] Krasilnikov N.N. Digital processing of 2D and 3D images. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 608 p. Available at: <https://books.google.ru/books?id=ssYLMX5gLpkC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>. (In Russ.)
- [10] Kaehler A., Bradski G. Learning OpenCV 3. Moscow: DMK Press, 2017, 826 p. (In Russ.)
- [11] Solem J.E. Programming Computer Vision with Python. Moscow: DMK-Press, 2016, 312 p. Available at: https://vk.com/wall-53449719_9798?ysclid=m5w8gnmmrl556769599. (In Russ.)
- [12] Hill Ch. Scientific programming in Python. Moscow: DMK Press, 2021, 646 p. Available at: <https://www.rulit.me/author/hill-kristian/nauchnoe-programmirovaniye-na-python-download-677121.html>. (In Russ.)