

Метод баланса белого для уменьшения уровня темновых шумов на интерференционных изображениях

Д. В. Дорофеев, Д. К. Кострин✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ dkkostrin@mail.ru

Аннотация. Рассматривается решение актуальной научно-технической задачи снижения уровня темнового шума на интерференционных изображениях. Данные картины регистрируются с помощью оптических камер, входящих в состав лазерного интерферометра, построенного по системе Физо, и используются в данном случае для контроля формы и качества линз. Для эффективного анализа интерференционной картины оператором наблюдаемое изображение должно быть как можно более высококонтрастным. Загрязнение линз, а также ограниченная чувствительность и собственные шумы применяемых камер приводят к возникновению значительного уровня шумов на регистрируемых изображениях. Существует большое количество различных методов устранения шумов, однако большинство из них не применимо в данном случае, что требует разработки специализированного алгоритма, который может быть встроен в драйвер камеры и должен отличаться быстродействием и отсутствием потери кадров при обработке потоковых данных. Представленный алгоритм применялся для баланса белого, с его помощью корректировалась гистограмма яркости каждого цвета, при этом яркие точки на изображении оставались яркими, а темные – темными, в отличие от работы других распространенных алгоритмов. Рассмотрено сравнение предложенного алгоритма с другими методами баланса белого на основе анализа более 2500 изображений интерферограмм. Также было проанализировано влияние нагрева матрицы оптической камеры на работу всех рассмотренных алгоритмов. Основным результатом проведенных исследований служит разработка оптимального с точки зрения соотношения быстродействия и производительности оригинального алгоритма баланса белого, демонстрирующего уменьшение влияния темнового шума, а также повышение контрастности изображений, что значительно улучшает их визуальное восприятие оператором при последующем анализе интерферограмм.

Ключевые слова: темновой шум, интерференционное изображение, оптическая камера, лазерный интерферометр, линза, математический алгоритм, гистограмма, баланс белого, контрастность

Для цитирования: Дорофеев Д. В. Кострин Д. К. Метод баланса белого для уменьшения уровня темновых шумов на интерференционных изображениях // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 2. С. 14–24. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-14-24.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

White Balance Method for Reducing the Level of Dark Noise in Interference Images

D. V. Dorofeev, D. K. Kostrin✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ dkkostrin@mail.ru

Abstract. The paper considers the solution of an urgent scientific and technical problem of reducing the level of dark noise in interference images. These pictures are recorded using optical cameras included in the laser interferometer, built according to the Fizeau system, and are used in this case to control the shape and quality of the lenses. For an effective analysis of the interference pattern by the operator, the observed image should

be as high-contrast as possible. Lens contamination, as well as limited sensitivity and the inherent noise of the cameras used, lead to significant noise levels in the recorded images. There are a large number of different noise reduction methods, but most of them are not applicable in this case, which requires the development of a specialized algorithm that can be integrated into the camera driver and should be characterized by high performance and no frame loss when processing streaming data. The algorithm presented in the paper was applied for white balance, it was used to adjust the histogram of brightness of each color, while the bright points in the image remained bright and the dark ones remained dark, unlike other common algorithms. The paper considers a comparison of the proposed algorithm with other white balance methods based on the analysis of more than 2500 interferogram images. The effect of heating the optical camera matrix on the operation of all the algorithms considered was also analyzed. The main result of the work carried out is the development of an original white balance algorithm that is optimal in terms of speed and performance, demonstrating a reduction in the influence of dark noise, as well as an increase in image contrast, which significantly improves their visual perception during subsequent analysis of interferograms by the operator.

Keywords: dark noise, interference image, optical camera, laser interferometer, lens, mathematical algorithm, histogram, white balance, contrast

For citation: Dorofeev D. V., Kostrin D. K. White Balance Method for Reducing the Level of Dark Noise in Interference Images // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 2. P. 14–24. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-14-24.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Интерферометры – это высокоточные оптические приборы, использующие явление интерференции волн для измерения малых расстояний, углов, показателей преломления, деформаций и других физических величин [1]. Данные устройства нашли широкое применение в науке, промышленности, медицине и космических исследованиях [2]. В частности, в современной оптоэлектронной промышленности интерферометры используются для контроля формы и качества линз, а также при калибровке эталонов [3].

В данной статье рассматривается интерферометр OptoTL-250 (ООО «Опто-Технологическая Лаборатория», Санкт-Петербург), представляющий собой лазерный интерферометр, построен-

ный по системе Физо [4]. На рис. 1 представлена оптическая схема такого интерферометра в упрощенном виде [5].

В качестве эталонной поверхности выступает плоская пластина, а для регистрации интерференционной картины применяются оптические камеры. Наблюдаемая картина представляет собой черно-белое изображение, на котором рассматриваемая линза имеет вид яркого светлого пятна с темными полосами. Пример снимка, полученного с помощью интерферометра, приведен на рис. 2, а. Для более эффективного анализа оператором изображение должно быть как можно более высококонтрастным.

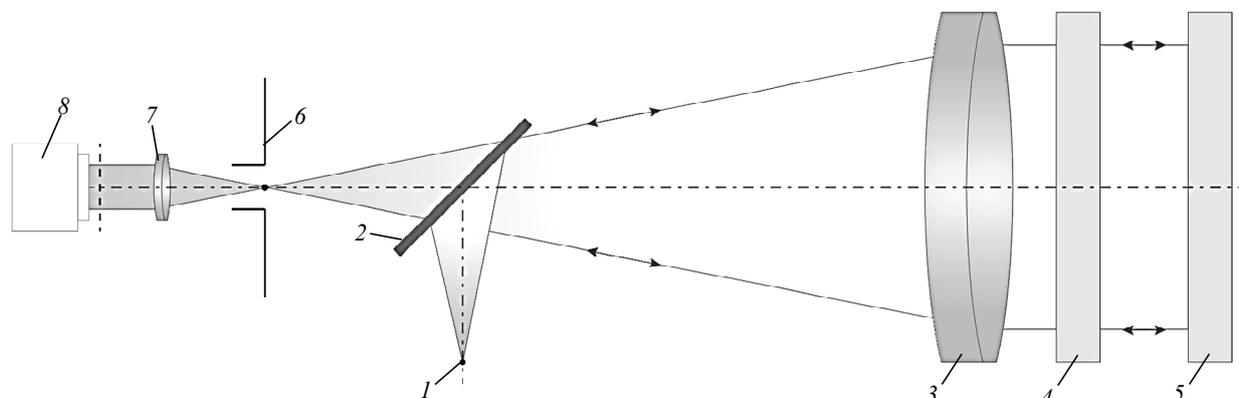


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра, построенного по системе Физо: 1 – источник оптического излучения; 2 – светоделительная пластина; 3 – коллимирующий объектив; 4 – эталонная пластина; 5 – исследуемый объект; 6 – диафрагма; 7 – объектив; 8 – оптическая камера

Fig. 1. Optical scheme of an interferometer built according to the Fizeau system: 1 – optical radiation source; 2 – beam-splitting plate; 3 – collimating lens; 4 – reference plate; 5 – object under study; 6 – aperture; 7 – lens; 8 – optical camera

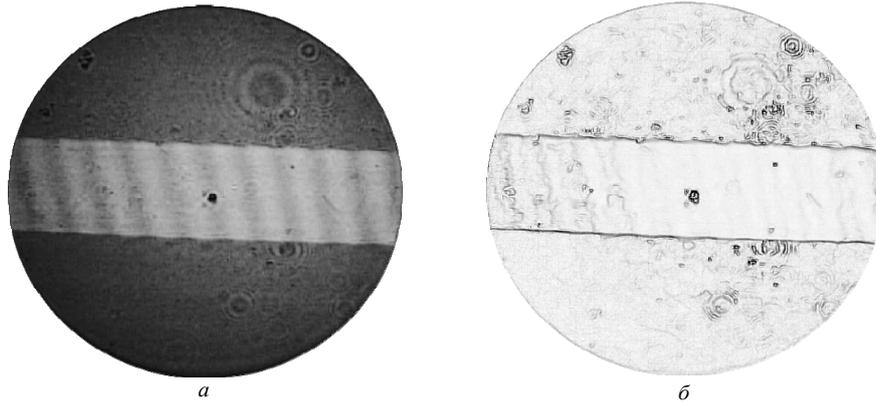


Рис. 2. Полученное с помощью интерферометра изображение интерференционной картины на линзе (а) и обработанное изображение с выделением контуров и повышением контрастности (б)

Fig. 2. Image of the interference pattern on the lens obtained with the help of an interferometer (a) and the processed image with contour highlighting and contrast enhancement (b)

Визуальное изучение интерференционной картины – динамичный процесс, а его интерпретация в значительной мере зависит от практического опыта оператора. Последний проводит исследование по всему полю изображения, чтобы определить тип, направление и значение имеющихся aberrаций (рис. 3) [6].

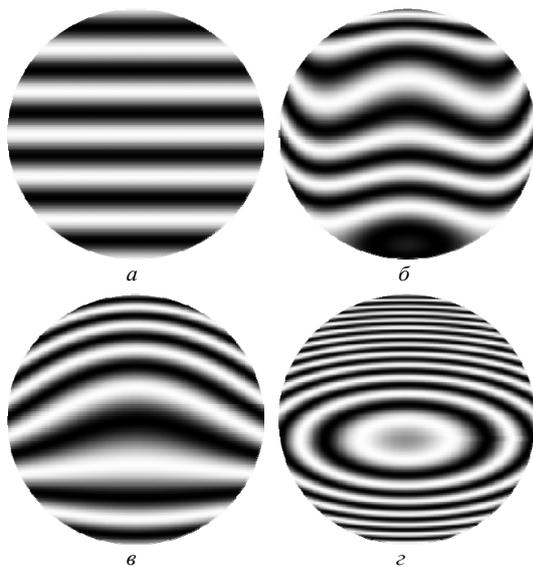


Рис. 3. Тип aberrаций по виду интерференционной картины: а – нет aberrаций; б – сферическая aberrация; в – кома; г – астигматизм

Fig. 3. Type of aberration by type of interference pattern: a – no aberration; б – spherical aberration; в – coma; г – astigmatism

При используемой в приборе компоновке узлов необходимо соблюдать чистоту линз, а также высокое качество применяемой оптической камеры. Загрязнение анализируемых линз, а также ограниченная чувствительность и собственные шумы применяемых камер приводят к возникно-

вению значительного уровня шумов на регистрируемых изображениях [7], [8].

Таким образом, актуальной целью служит снижение уровня темнового шума на интерференционных изображениях, что позволит повысить эффективность их анализа оператором. Существует достаточно большое число различных методов устранения шумов на интерференционных изображениях [9]–[11], однако большинство из них не может быть применено в рассматриваемой ситуации. Задача, решаемая в данной статье, – это разработка специализированного алгоритма, который может быть встроен в драйвер оптической камеры, что требует его высокого быстродействия и отсутствия потери кадров.

Методы исследования. Современные программные средства (в том числе доступные онлайн) позволяют достаточно просто выделять контуры на изображениях и повышать их контрастность (рис. 2, б). Однако в таком случае снимки обрабатываются в течение существенного интервала времени, и такое программное обеспечение не способно обеспечить потоковую обработку визуальной информации.

Существует большое количество специализированных методов и алгоритмов для устранения шумов цифровых изображений [12]–[14]. Например, можно охлаждать матрицу фотоприемника и калибровать изображение по темновому снимку. Однако подобный алгоритм применим далеко не во всех интерферометрах, особенно в тех, где камера находится в закрытом кожухе, когда доступ к ней затруднителен и предполагается непрерывное использование прибора.

Также к распространенным способам борьбы с шумами на изображениях относится метод размытия Гаусса, но при использовании этого подхода также размываются и границы линий, что затрудняет визуальный анализ интерференционных картин. Таким образом, применение данного алгоритма не всегда оправдано.

Не подходят в данном случае также алгоритмы, которые предполагают потерю кадров. Поэтому для выполнения задачи фильтрации шумов на интерферограммах необходим алгоритм, который может быть встроен в драйвер оптической камеры относительно быстро и не приводит к потере кадров видеопотока.

На получаемое с оптической камеры изображение оказывают влияние различные виды шума, в том числе и темновой шум, который хорошо заметен при съемке на длительной выдержке, а также в темных помещениях. Шум данного вида может быть связан как с нагреванием матрицы фотоприемника, так и с утечкой тока. Поскольку регистрация интерферограммы представляет собой съемку яркого пятна на темном фоне, то темновой шум в таком случае очень заметен. Убрать шум указанного вида – это важная техническая задача, решение которой необходимо для повышения качества и информативности интерференционной картины, особенно в случае достаточно темного изображения [15].

Темновой шум определяется темновым током матричного фотоприемного устройства. Таким образом, одним из методов борьбы с темновым шумом служит контроль параметров составных частей фотоприемника, а также квантовой эффективности фоточувствительных элементов матрицы. Данные параметры определяют такие фотоэлектрические свойства, как пороговая облученность, мощность, разность температур, вольт-амперная и температурная чувствительность, однородность характеристик по площади, а также количество дефектных чувствительных элементов [16]. Следует отметить, что у качественного матричного фотоприемного устройства однородность по всем элементам должна быть не хуже 10%. Соответствующие ограничения накладываются и на значения темновых токов и квантовую эффективность. В противном случае фотоприемное устройство считается дефектным. В данном случае использовался фотоприемник, удовлетворяющий основным требованиям годности прибора на техниче-

ском уровне, что позволило провести исследование иных методов устранения темновых шумов.

В [17] рассматривается метод баланса белого, основанный на модификации интенсивности света по специализированному алгоритму. В результате применения данного метода получено, что в целом изображение с точки зрения наличия шумов оказывается локально лучше. Оно получается намного более контрастным и удобным для визуального восприятия. В данном случае предлагается изменение интенсивности света по следующей формуле [17]:

$$I_{\text{нов}} = (vI_{\text{ст}}^2 + uI_{\text{ст}}) \frac{I_{\text{max}}}{255}, \quad (1)$$

приводящее к частичному улучшению изображения за счет уменьшения уровня темнового шума.

В формуле (1) $I_{\text{нов}}$ – яркость пикселя после преобразования, $I_{\text{ст}}$ – яркость пикселя до преобразования, I_{max} – максимальная яркость обрабатываемого изображения, v и u – коэффициенты разложения яркости изображения, регулирующие его яркость и контрастность. Контрастность изображения задается при помощи коэффициента v , яркость изображения – при помощи коэффициента u . Таким образом, яркость светлых и темных пикселей будет регулироваться по-разному.

Формула (1) описывает квадратичное преобразование яркости, график которого – парабола. В случае если $v > 0$, то ветви параболы направлены вверх, тогда светлые участки становятся светлее, а темные – темнее, что увеличивает контрастность изображения. Например, если коэффициент $v = 0.99$, а коэффициент $u = 0.01$, графиком функции будет парабола, приведенная на рис. 4, а.

Подбор коэффициентов представляет собой основную задачу алгоритма, они рассчитываются для всего изображения. Подобное преобразование яркости растягивает гистограмму изображения по всему диапазону, что может приводить к незначительному просветлению изображения (рис. 4, б). Для коррекции восприятия изображения модифицируется его контрастность, для повышения контрастности разложение домножается на соотношение максимальной зафиксированной яркости к максимально возможному значению яркости. Коррекция осуществляется для каждого канала. Коэффициенты u и v используются для разложения яркости пикселя и вычисляются по формуле

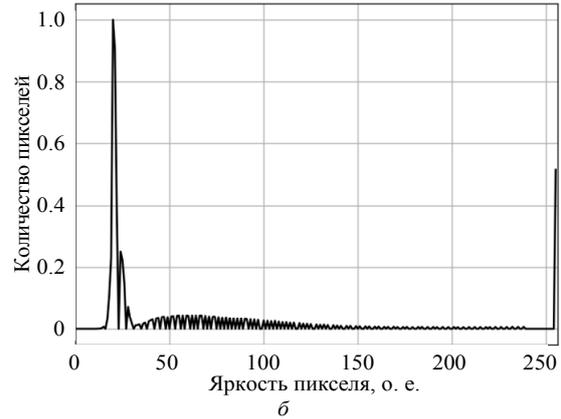
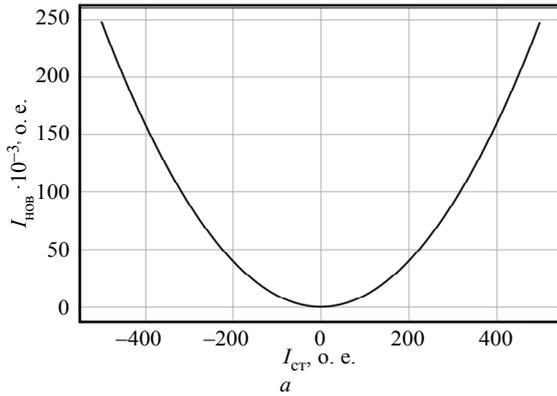


Рис. 4. График функции (а) и гистограмма изображения (б) для алгоритма с коэффициентами $v = 0.99$, $u = 0.01$
Fig. 4. Graph of the function (a) and histogram of the image (b) for the algorithm with coefficients $v = 0.99$, $u = 0.01$

$$\begin{pmatrix} u_r \\ v_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sum}(I) & \text{sum}(I_r) \\ \max(I) & \max(I_r) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \max(I) \\ \max(r) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\text{sum}(I)$, $\text{sum}(I_r)$ – максимальные суммы яркостей пикселей всех каналов и отдельно красного канала; $\max(I)$, $\max(r)$ – максимальные квадраты яркости пикселей всех каналов и отдельно красного канала. Максимальная сумма яркостей пикселей красного канала определяется как

$$\text{sum}(I_r) = \sum_i^{wh} r_i, \quad (3)$$

где w – ширина изображения; h – высота изображения; r_i – яркость пикселя красного канала. Аналогично определяются максимальные суммы яркостей пикселей зеленого $\text{sum}(I_g)$ и синего $\text{sum}(I_b)$ каналов. Максимальная сумма яркостей пикселей всех каналов определяется как

$$\text{sum}(I) = \max(\text{sum}(I_r), \text{sum}(I_g), \text{sum}(I_b)). \quad (4)$$

Зная параметры из формул (3), (4), можно найти коэффициенты u и v . Ниже приведены формулы для вычисления этих коэффициентов:

$$u_r = \frac{\max(I_r)\text{sum}(I) - \text{sum}(I_r)\max(I)}{\text{sum}(I_r)^2\max(I) - \max(I_r)^2\text{sum}(I)}; \quad (5)$$

$$v_r = \frac{\text{sum}(I_r)^2\max(I) - \max(I_r)^2\text{sum}(I)}{\text{sum}(I_r)^2\max(I) - \max(I_r)^2\text{sum}(I)}. \quad (6)$$

Алгоритм, представленный формулами (2)–(6), применялся для баланса белого. С его помощью растяжением корректировалась гистограмма яркости каждого цвета, при этом яркие точки оставались яркими, а темные – темными, в отличие, например, от алгоритма «Серый мир». Последний алгоритм хорошо работает с однотонны-

ми изображениями, но при этом может сильно изменять цвета при обработке цветных изображений, а также существенно затемнять изображение при работе с черно-белыми изображениями.

Коэффициенты разложения яркости изображения в разработанном методе баланса белого получены по результатам моделирования большого объема данных, что отличается от подхода, используемого в методе растяжения, в котором используются лишь максимальные значения интенсивности. В данном случае оптимальные значения коэффициентов определялись как наилучшие значения по большому массиву обработанных данных.

Результаты и их обсуждение. На рис. 5 приведены гистограммы интерференционной картины до и после коррекции с применением разработанного алгоритма. Можно сказать, что изображение после применения алгоритма получилось более контрастным, также наблюдается уменьшение уровня темновых шумов.

Кроме уже рассмотренного существуют и другие алгоритмы баланса белого, например упомянутый ранее «Серый мир» [18] или алгоритм «Ретинекс» [19], [20]. Рассмотрим сравнение представленного в данной статье алгоритма с другими алгоритмами баланса белого на основе анализа более 2500 изображений интерферограмм.

1. Алгоритм баланса белого «Серый мир» – один из самых известных и универсальных. Преобразование осуществляется отдельно для каждого пикселя каждого цвета по следующей формуле [18]:

$$I_{r \text{ нов}} = I_{r,i} \frac{A_{v,g}}{I_{r \text{ ср}}},$$

где $A_{v,g}$ – коэффициент преобразования, рассчитываемый по формуле

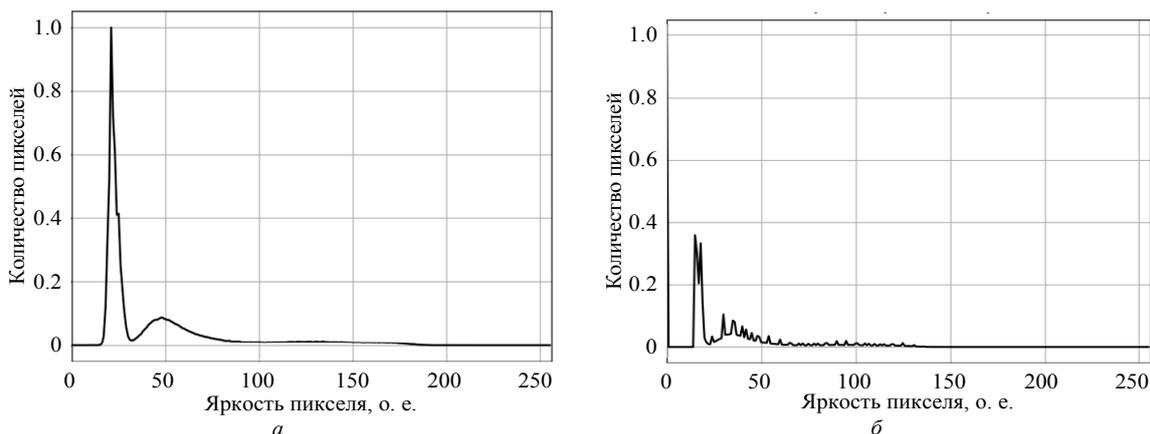


Рис. 5. Гистограммы интерференционного изображения до (а) и после (б) применения разработанного алгоритма
 Fig. 5. Histograms of the interference image before (a) and after (b) the application of the developed algorithm

$$A_{v,g} = \frac{I_r \text{ ср} + I_g \text{ ср} + I_b \text{ ср}}{3};$$

$$I_r \text{ ср} = \frac{1}{N} \sum I_{r,i}(x, y)$$

– средняя яркость для красных пикселей, где N – количество пикселей изображения; $I_{r,i}$ – яркость пикселя красного цвета. Аналогично рассчитываются средние яркости для других цветов изображения.

На рис. 6 приведена гистограмма рассмотренного ранее изображения после применения данного алгоритма, который, как и все рассмотренные в этой статье, был реализован на языке Python. Время его работы составило 20 мс. При этом отношение сигнал/шум составило 29.96 дБ, в то время как у оригинального изображения оно равно 30.275 дБ. Медианное значение данного параметра для алгоритма «Серый мир» равно 30 дБ, а дисперсия составляет 0.14 дБ. Таким образом, данный алгоритм дает достаточно стабильные значения, однако характеризуется небольшим снижением отношения сигнал/шум.

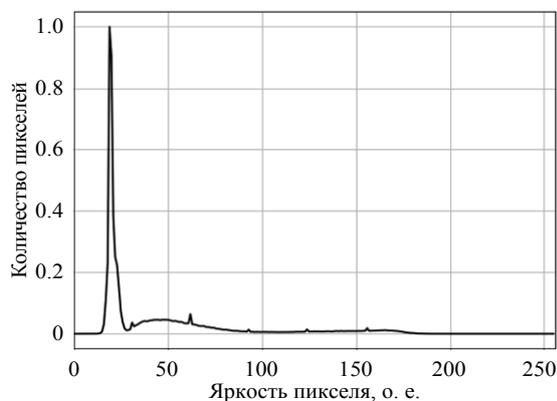


Рис. 6. Гистограмма интерференционного изображения после применения алгоритма «Серый мир»
 Fig. 6. Histogram of the interference image after applying the «Gray World» algorithm

2. Алгоритм «Ретинекс», основанный на теории цветового постоянства, был предложен Э. Лэндом в 1971 г. Теория алгоритма «Ретинекс» объясняет, как человеческий глаз воспринимает цвета независимо от освещения. У этого метода есть множество вариаций, на рис. 7 приведена гистограмма изображения после применения одномасштабного метода «Ретинекс». В данном случае преобразование для красного канала осуществляется следующим образом [19]:

$$I_{\text{пр } r}(x, y, \sigma) = \log(I_r(x, y)) - \log(I_r(x, y)g(x, y, \sigma)),$$

где I_r – яркость красного пикселя; g – функция Гаусса; σ – коэффициент размытия. Так как после осуществления данной операции результат преобразования лежит в диапазоне от -1 до 1 , необходимо скорректировать преобразованное значение яркости красного пикселя $I_{\text{пр } r}$ для получения нового значения яркости:

$$I_{\text{нов } r} = 255I_{\text{пр } r} + 127.5.$$

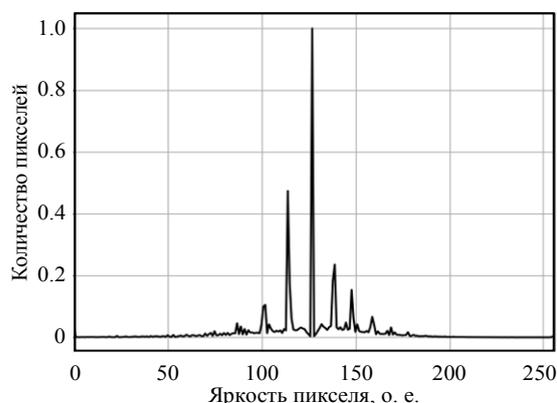


Рис. 7. Гистограмма интерференционного изображения после применения алгоритма «Ретинекс»
 Fig. 7. Histogram of the interference image after applying the «Retinex» algorithm

Аналогично рассчитываются яркости других цветов изображения.

Время работы данного алгоритма составило 143 мс, а отношение сигнал/шум – 20.37 дБ. Медианное значение этого параметра равно 20.41 дБ, а дисперсия составляет 0.25 дБ. Таким образом, данный алгоритм сильно снижает отношение сигнал/шум, но при этом достаточно стабилен.

3. Еще одним из известных алгоритмов подстройки баланса белого служит метод, предложенный А. Л. Кальяновым и др. [21], [22], основанный на алгоритме «Серый мир». Результат его работы приведен на рис. 8. Время работы данного алгоритма составило 33 мс, отношение сигнал/шум – 29.595 дБ, медианное значение – 29.25 дБ, а дисперсия – 0.34 дБ.

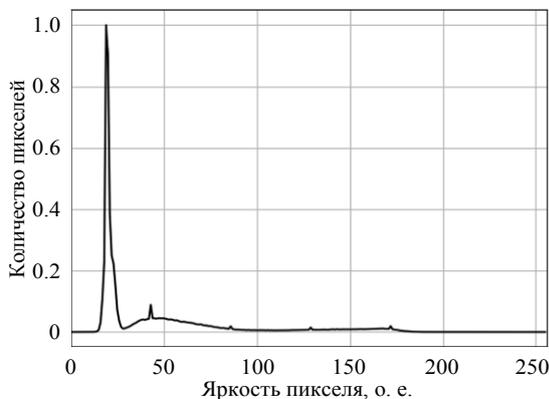


Рис. 8. Гистограмма интерференционного изображения после применения алгоритма по методу А. Л. Кальянова и др.

Fig. 8. Histogram of the interference image after applying the algorithm according to the method of A. L. Kalyanov et al

В свою очередь, отношение сигнал/шум представленного в данной работе алгоритма составило 31.71 дБ, медианное значение – 31.71 дБ, а дисперсия – 1.57 дБ, при этом время работы алгоритма равняется 43 мс. Таким образом, разработанный алгоритм показывает хорошие результаты как по быстродействию, так и по отношению сигнал/шум, однако имеет достаточно большую дисперсию.

4. Еще одним из способов борьбы с темновым шумом на изображениях служит гауссово размытие, время работы которого составляет всего 12 мс. Отношение сигнал/шум для этого алгоритма составляет 31.49 дБ, медианное значение – 31.57 дБ, а дисперсия – 0.38 дБ. Преобразование в данном случае осуществляется следующим образом [23]:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$

где σ – среднееквадратическое отклонение; x – горизонтальное смещение от ядра свертки; y – вертикальное смещение от ядра свертки. Для получения результирующего изображения необходимо применить операцию свертки для всего преобразуемого изображения. На рис. 9 приведена гистограмма изображения после применения гауссова размытия.

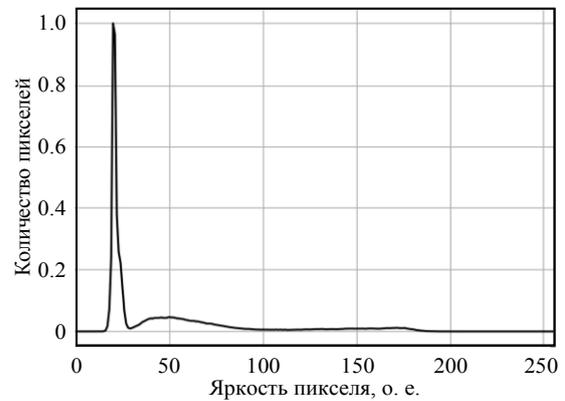


Рис. 9. Гистограмма интерференционного изображения после применения гауссова размытия
Fig. 9. Histogram of the interference image after applying Gaussian blur

Можно отметить, что гауссово размытие применяется на все изображение, – таким образом увеличивается размытие и у полос интерферограммы, что приводит к ухудшению восприятия итогового изображения оператором.

Заметим, что при реализации алгоритма темновой кадровой коррекции для обработки интерференционных изображений возникли сложности, выражающиеся в возникновении заметных артефактов на изображении, поэтому для дальнейшего анализа данный алгоритм не использовался.

Разработанный алгоритм может работать с оптическими камерами с частотой 25–30 кадр/с. Учитывая, что алгоритм был реализован на языке Python, для ускорения действия можно перевести его на такие языки программирования, как С или CUDA, и обрабатывать изображения, поступающие с камеры при помощи графического ядра в реальном времени. Подобный подход может ускорить выполнение алгоритма как минимум в два раза. Принимая во внимание тот факт, что при работе камеры интерферометра не требуется большая частота кадров, время работы разработанного алгоритма позволяет эффективно использовать его для интерферометрии.

Дополнительно был проведен анализ контрастности полученных изображений после применения вышеприведенных алгоритмов. Контрастность определялась по Михельсону [24], у оригинального изо-

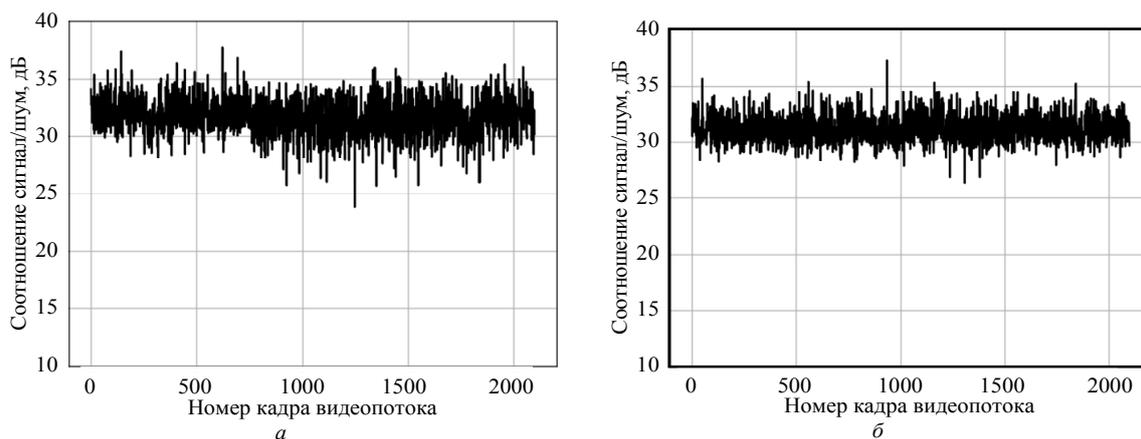


Рис. 10. Работа разработанного алгоритма на «холодной» (а) и «горячей» матрице (б)

Fig. 10. Operation of the developed algorithm on the «cold» (a) and «hot» matrix (b)

Результаты расчета отношения сигнал/шум для рассмотренных алгоритмов
Results of calculating the signal-to-noise ratio for the considered algorithms

Алгоритм	Отношение сигнал/шум, дБ		
	«Холодная» матрица	«Горячая» матрица	Среднее значение
Разработанный алгоритм	31.707	31.213	31.460
«Серый мир»	29.962	29.764	29.863
«Ретинекс»	20.367	20.265	20.316
По методу А. Л. Кальянова и др.	29.990	29.200	29.595
Гауссово размытие	31.490	30.560	31.025
Оригинальное изображение	30.713	29.370	30.041

бражения она составила 0.981, у алгоритмов «Серый мир» и алгоритма по А. Л. Кальянову и др. контрастность та же, что и у оригинального изображения. У алгоритма «Ретинекс» и разработанного алгоритма контрастность составила 0.999. Критерий контрастности итогового изображения очень важен, так как в рассматриваемом случае необходимо различать интерференционную картину, и поэтому высококонтрастное изображение в значительной мере упрощает работу оператора с оборудованием.

Был проанализирован нагрев матрицы оптической камеры. Как уже упоминалось, из-за сложной конструкции интерферометра, а также из-за важности отсутствия движения воздуха внутри его корпуса принудительное охлаждение матрицы затруднительно. Однако необходимо рассмотреть влияние нагрева матрицы на отношение сигнал/шум.

Для анализа работы алгоритмов с «горячей» и «холодной» матрицами снимались кадры в начале рабочего дня и в его конце. На рис. 10 в качестве примера приведены результаты применения разработанного алгоритма на «холодной» и «горячей» матрицах.

Среднее значение отношения сигнал/шум для «холодной» матрицы составило 31.707 дБ, а для

«горячей» – 31.213 дБ. В таблице приведены статистические и средние значения отношения сигнал/шум для всех рассмотренных ранее алгоритмов.

Применение разработанного алгоритма позволило повысить качество изображения. Гауссово размытие также улучшает отношение сигнал/шум изображения, но при этом сильно ухудшает визуальное восприятие, что осложняет работу оператора. Среди важных критериев применения алгоритма – скорость его действия. Для ее увеличения возможно применение одних и тех же коэффициентов коррекции для нескольких изображений подряд. Это вполне допустимо, так как нагрев матрицы не настолько сильно влияет на получаемые изображения и для нескольких следующих подряд, например пяти, кадров коэффициенты коррекции практически не изменяются.

Закключение. Основным результатом проведенной работы стало создание оптимального с точки зрения соотношения быстродействия и производительности оригинального алгоритма баланса белого, демонстрирующего уменьшение влияния темнового шума, а также повышение контрастности изображений, что значительно улучшает их визуальное восприятие при последующем анализе интерферограмм оператором.

Традиционные методы обработки изображений обычно нацелены на субъективное улучшение их качества и неадекватно справляются с ошибками и искажениями. Предложенный алгоритм позволяет объективно улучшить изображение, в том числе и при обработке потоковых данных. Устройство формирования изображения может быть подключено через внешний интерфейс, например порт последовательной шины или последовательного соединения, порт IEEE-1394 или Ethernet, а также модем. Обработка изображения предложенным методом допустима с помощью дополнительного драйвера с задержкой сигнала в несколько миллисекунд при использовании специализированного графического процессора.

По сравнению с алгоритмом «Серый мир» разработанный алгоритм обладает меньшей скоростью работы, однако лучшей контрастностью, что облегчает восприятие изображения оператором.

Алгоритм «Ретинекс» обладает намного меньшей скоростью работы, чем разработанный алгоритм, а обработанное с его помощью изображение, по оценке операторов, воспринимается хуже. Алгоритм по методу А. Л. Кальянова и др. имеет скорость работы, схожую со скоростью работы разработанного алгоритма, но при этом не изменяет контрастность изображения. В свою очередь, применение гауссова размытия при его высоком быстродействии в значительной мере уменьшает удобство восприятия изображения оператором.

Также можно отметить, что обработка интерференционных изображений может проводиться с применением нейронных сетей, причем как для подавления шумовой составляющей, так и для последующей обработки изображения для помощи оператору или, в перспективе, – для автоматизированного контроля.

Список литературы

1. Александров Д. В. Разработка методов исследования свойств наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных // Перспективные материалы. 2010. № 9. С. 9–11.
2. Двухканальный интерферометр для измерения рельефа движущихся поверхностей / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // Приборы. 2016. № 12. С. 5–9.
3. Лукин А. В. Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля оптических асферических поверхностей в Государственном институте прикладной оптики. Обзор // Оптический журн. 2024. Т. 91, № 3. С. 95–114. doi: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114.
4. Краснов Д. И., Нгуен С. Ч., Дружин В. В. Интерференционный метод контроля выпуклых гиперболических поверхностей с использованием дифракционного оптического элемента // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2022. № 4. С. 80–91. doi: 10.18698/0236-3933-2022-4-80-91.
5. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей / А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, А. Е. Маточкин, Р. К. Насыров, В. В. Черкашин // Фотоника. 2016. № 4. С. 38–51. doi: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50.
6. Кирилловский В. К., Трухин М. М., Фролов Д. Н. Интерферометрический контроль качества деталей объективов // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 9. С. 27–37.
7. Исследование точности определения положения объекта с применением оптико-электронной системы наблюдения / Н. С. Морев, Д. К. Кострин, В. А. Симон, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 2. С. 5–10.
8. Беляков А. В., Гуров И. П. Улучшение интерферограмм методом вейвлет-преобразования // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2002. № 2. С. 148–152.
9. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, А. Ю. Земцов, С. А. Степанов // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 140–144.
10. Жужукин А. И., Соляников В. А. Применение поляризационного фильтра для увеличения соотношения сигнал/шум на спекл-интерферограммах // Компьютерная оптика. 2011. № 35. С. 220–223.
11. Комплексная обработка интерферограмм светозероизонных газово-плазменных потоков в вакууме / Е. Ю. Локтионов, Ю. Ю. Протасов, В. Д. Телех, Р. Р. Хазиев // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 53. doi: 10.7868/S0032816213010072.
12. Timonov A. A. Numerical image denoising and deblurring via an approximate weighted mean curvature flow model // Numerical Methods and Programming. 2024. Vol. 25, № 2. P. 115–126. doi: 10.26089/NumMet.v25r210.
13. Гошин Е. В., Архипова Д. В. Метод фильтрации шумов на изображениях в пространстве разреженных представлений // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 3. С. 432–438. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1412.
14. Generating a true color image with data from scanning white-light interferometry by using a Fourier transform / J.-Y. Kim, S. Kim, M.-G. Kim, H. J. Pakh // Current Optics and Photonics. 2019. Vol. 3, № 5. P. 408–414. doi: 10.1364/COPP.3.000408.
15. Хрящев Д. А. Повышение качества изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности // Инженерный вестн. Дона. 2013. № 3. С. 56.
16. Патрашин А. И. Метод расчета параметров ИК матричного фотоприемного устройства // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103–108.

17. Дорофеев В. Ю., Дорофеев Д. В. Методы баланса белого для изображений // Сб. науч. тр. кафедры высш. математики СПбГЭУ. СПб.: СПбГЭУ, 2024. С. 46–48.
18. Li X., Wu J. Improved Gray World Algorithm Based on Salient Detection // Communications in Comp. and Information Sci. 2013. Vol. 363. P. 315–321. doi: 10.1007/978-3-642-37149-3_38.
19. Cai R., Chen Z. Brain-like Retinex: A biologically plausible retinex algorithm for low light image enhancement // Pattern Recognition. 2023. Vol. 136. P. 109195. doi: 10.1016/j.patcog.2022.109195.
20. Cycle-Retinex: Unpaired low-light image enhancement via Retinex-inline CycleGAN / K. Wu, Ju. Huang, Y. Ma, F. Fan, J. Ma // IEEE Transactions on Multimedia. 2024. Vol. 26. P. 1213–1228. doi: 10.1109/TMM.2023.3278385.
21. Colour sensor white balance Influence on white-light interferometer resolution / A. Kalyanov, V. Lychagov, I. Smirnov, V. Ryabukho // Proc. of the Intern. Conf. on Advanced Laser Technol. Bern, 2012. Vol. 1. P. 58. doi: 10.12684/alt.1.58.
22. White-light full-field OCT resolution improvement by image sensor colour balance adjustment: Numerical simulation / A. L. Kalyanov, V. V. Lychagov, V. P. Ryabukho, I. V. Smirnov // J. of Optics. 2012. Vol. 14, № 12. P. 125708. doi: 10.1088/2040-8978/14/12/125708.
23. Handling Gaussian blur without deconvolution / J. Kostkova, J. Flusser, M. Lebl, M. Pedone // Pattern Recognition. 2020. Vol. 103. P. 107264. doi: 10.1016/j.patcog.2020.107264.
24. Голуб Ю. И., Старовойтов Ф. В. Исследование локальных оценок контраста цифровых изображений при отсутствии эталона // Системный анализ и прикладная информатика. 2019. № 2. С. 4–11. doi: 10.21122/2309-4923-2019-2-4-11.

Информация об авторах

Дорофеев Дмитрий Вячеславович – аспирант гр. 5921 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: watson213@yandex.ru

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

References

- Aleksandrov D. V. Razrabotka metodov issledovaniya svoystv nanomaterialov s ispol'zovaniem lazernykh interferometrov i kompjuternoj obrabotki dannykh // Perspektivnye materialy. 2010. № 9. S. 9–11. (In Russ.).
- Dvuhkanalnyj interferometr dlja izmereniya relefa dvizhushhihsja poverhnostej / E. V. Sysoev, I. A. Vyhrstjuk, R. V. Kulikov, V. V. Shirokov // Pribory. 2016. № 12. S. 5–9. (In Russ.).
- Lukin A. V. Tehnologii formoobrazovaniya i metody lazerno-golograficheskogo kontrolja opticheskikh poverhnostej v Gosudarstvennom institute prikladnoj optiki. Obzor // Opticheskij zhurn. 2024. T. 91, № 3. S. 95–114. doi: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114. (In Russ.).
- Krasnov D. I., Nguen S. Ch., Druzhin V. V. Interferentsionnyj metod kontrolja vypuklykh giperbolicheskikh poverhnostej s ispol'zovaniem difraktsionnogo opticheskogo elementa // Vestn. MGU im. N. E. Baubana. Ser. Priborostroenie. 2022. № 4. S. 80–91. doi: 10.18698/0236-3933-2022-4-80-91. (In Russ.).
- Lazernye interferometry dlja kontrolja formy opticheskikh poverhnostej / A. G. Poleschuk, V. N. Khomutov, A. E. Matochkin, R. K. Nasyrov, V. V. Cherkashin // Fotonika. 2016. № 4. S. 38–51. doi: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50. (In Russ.).
- Kirillovskij V. K., Truhin M. M., Frolov D. N. Interferometricheskij kontrol kachestva detalej ob'ektivov // Nauch.-tehn. vestn. informatsionnykh tehnologij, mehaniki i optiki. 2007. № 9. S. 27–37. (In Russ.).
- Issledovanie tochnosti opredeleniya polozhenija ob'ekta s primeneniem optiko-elektronnoj sistemy nablyudeniya / N. S. Morev, D. K. Kostrin, V. A. Simon, A. A. Ukhov // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 2. S. 5–10. (In Russ.).
- Beljakov A. V., Gurov I. P. Uluchshenie interferogrammi metodom veivlet-preobrazovaniya // Nauch.-tehn. vestn. informatsionnykh tehnologij, mehaniki i optiki. 2002. № 2. S. 148–152. (In Russ.).
- Razrabotka metodov i programmykh sredstv podavleniya shumov v interferogrammakh na etape ih predvaritelnoj obrabotki / G. I. Greisuh, E. G. Ezhov, A. Yu. Zemtsov, S. A. Stepanov // Kompjuterijna optika. 2005. № 28. S. 140–144. (In Russ.).
- Zhuzhukin A. I., Soljannikov V. A. Primenenie polarizatsionnogo filtra dlja uvelicheniya sootnosheniya signal/shum na spekl-interferogrammakh // Kompjuterijna optika. 2011. № 35. S. 220–223. (In Russ.).
- Kompleksnaja obrabotka interferogrammi svetozerozionnykh gazovo-plazmennyykh potokov v vakuume / E. Yu. Loktionov, Yu. Yu. Protasov, V. D. Teleh, R. R. Hazi-ev // Pribory i tehnika eksperimenta. 2013. № 1. S. 53. doi: 10.7868/S0032816213010072. (In Russ.).
- Timonov A. A. Numerical image denoising and deblurring via an approximate weighted mean curvature flow model // Numerical Methods and Programming. 2024. Vol. 25, № 2. P. 115–126. doi: 10.26089/NumMet.v25r210.

13. Goshin E. V., Arhipova D. V. Metod filtratsii shumov na izobrazhenijah v prostranstve razrezhenykh predstavlenij // Kompjuternaja optika. 2024. T. 48, № 3. S. 432–438. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1412. (In Russ.).
14. Generating a true color image with data from scanning white-light interferometry by using a Fourier transform / J.-Y. Kim, S. Kim, M.-G. Kim, H. J. Pakh // Current Optics and Photonics. 2019. Vol. 3, № 5. P. 408–414. doi: 10.1364/COPP.3.000408.
15. Hryashhev D. A. Povyshenie kachestva izobrazhenij, poluchennykh v uslovijah nedostatochnoj osveshennosti // Inzhenernyj vestn. Dona. 2013. № 3. S. 56. (In Russ.).
16. Patrashin A. I. Metod rascheta parametrov IK matrichnogo fotopriemnogo ustrojstva // Prikladnaja fizika. 2010. № 2. S. 103–108. (In Russ.).
17. Dorofeev V. Yu., Dorofeev D. V. Metody balansa belogo dlja izobrazhenij // Sb. nauch. tr. kafedry vyssh. matematiki SPbGEU. SPb.: SPbGEU, 2024. S. 46–48. (In Russ.).
18. Li X., Wu J. Improved Gray world algorithm based on salient detection // Communications in Comp. and Information Sci. 2013. Vol. 363. P. 315–321. doi: 10.1007/978-3-642-37149-3_38.
19. Cai R., Chen Z. Brain-like Retinex: A biologically plausible retinex algorithm for low light image enhancement // Pattern Recognition. 2023. Vol. 136. P. 109195. doi: 10.1016/j.patcog.2022.109195.
20. Cycle-Retinex: Unpaired low-light image enhancement via Retinex-inline CycleGAN / K. Wu, Ju. Huang, Y. Ma, F. Fan, J. Ma // IEEE Transactions on Multimedia. 2024. Vol. 26. P. 1213–1228. doi: 10.1109/TMM.2023.3278385.
21. Colour sensor white balance influence on white-light interferometer resolution / A. Kalyanov, V. Lychagov, I. Smirnov, V. Ryabukho // Proc. of the Intern. Conf. on Advanced Laser Technol. Bern, 2012. Vol. 1. P. 58. doi: 10.12684/alt.1.58.
22. White-light full-field OCT resolution improvement by image sensor colour balance adjustment: Numerical simulation / A. L. Kalyanov, V. V. Lychagov, V. P. Ryabukho, I. V. Smirnov // J. of Optics. 2012. Vol. 14, № 12. P. 125708. doi: 10.1088/2040-8978/14/12/125708.
23. Handling Gaussian blur without deconvolution / J. Kostkova, J. Flusser, M. Lebl, M. Pedone // Pattern Recognition. 2020. Vol. 103. P. 107264. doi: 10.1016/j.patcog.2020.107264.
24. Golub Yu. I., Starovoitov F. V. Issledovanie lokalnykh otsenok kontrasta tsifrovyykh izobrazhenij pri otsutstvii etalona // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. 2019. № 2. S. 4–11. doi: 10.21122/2309-4923-2019-2-4-11. (In Russ.).

Information about the authors

Dmitry V. Dorofeev – postgraduate student of gr. 5921. Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: watson213@yandex.ru

Dmitry K. Kostrin – Dr. Sci. (Eng.), professor of the department of electronic instruments and devices. Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: dkkostrin@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; принята к публикации после рецензирования 03.02.2026; опубликована онлайн 26.02.2026.

Submitted 27.01.2026; accepted 03.02.2026; published online 26.02.2026.
