

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 621.384.3

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РЕГИСТРАЦИИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ ЯРКОСТИ
НА ФУНКЦИЮ РАССЕЯНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯ***Пивторак Д. А.**Национальный технический университет Украины**“Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина**E-mail: p_diana@i.ua*

При регистрации изображения объектов с большим интервалом яркости в пределах кадра управление экспозицией должно осуществляться для каждого элементарного участка кадра. В известных регистраторах, оснащенных экспонометрическими устройствами, осуществляющими такое управление, используются мультипликативный, аддитивный и комбинированный способы регистрации изображения.

Применение мультипликативного способа приводит к значительным энергетическим потерям в оптическом канале, что требует изменения экспонометрических параметров системы (увеличения эффективной выдержки затвора, повышения чувствительности сенсора или дополнительного усиления выходного сигнала).

Использование аддитивного способа позволяет сузить динамический диапазон регистрируемого оптического сигнала и уменьшить эффективную выдержку затвора, однако приводит к снижению контраста мелких деталей результирующего изображения.

Применение комбинированного способа позволяет подавить малоинформативные низкочастотные составляющие спектра выходного сигнала, уменьшить при этом потери от сдвига изображения и уменьшить контраст изображений мелких деталей. Использование комбинированного способа позволяет согласовать динамические диапазоны регистрируемого оптического сигнала и регистратора, при этом минимизируется влияние недостатков мультипликативного и аддитивного способов, применяемых самостоятельно.

В статье получено выражение для функции рассеяния при регистрации изображения объектов фотографирования с большим диапазоном яркости комбинированным способом. Проанализировано влияние параметров процесса регистрации изображения комбинированным способом на функцию рассеяния результирующего изображения. Выражение может быть использовано при проведении теоретических исследований влияния процесса комбинированного способа регистрации изображений на эффективность съёмки.

Ключевые слова: *функция рассеяния; динамический диапазон; изображение.*

Введение

При проведении фотосъёмки объектов с большим интервалом яркости может теряться часть информации. В первую очередь это определяется возможным несоответствием динамического диапазона регистрируемого оптического сигнала динамическому диапазону фоторегистратора.

Для минимизации потерь широко распространена технология HDR (High Dynamic Range Image – изображение с широким динамическим диапазоном) [1, 2], а также в регистраторах фотографической информации применяется пространственная фильтрация входного сигнала. Как правило, любой современный фотоаппарат оснащается экспонометрическим устройством – простейшим фильтром, позволяющим подавить низкие пространственные частоты входного оптического сигнала, повысив тем самым качество результирующего изображения.

При необходимости регистрации изображения объекта фотографирования, имеющего большой интервал яркости в пределах кадра, управление экспозицией должно осуществляться для каждого элементарного участка кадра. В известных регистраторах, оснащённых экспонометрическими устройствами, осуществляющими такое управление экспозицией, используется мультипликативный, аддитивный или комбинированный способ регистрации изображения [3 – 5].

Мультипликативный способ регистрации изображения с большим интервалом яркости (метод нерезкого маскирования) заключается в экспонировании светочувствительной площадки сенсора через предварительно построенную частотно-избирательную фильтр-маску [6]. Наличие маски приводит к значительным энергетическим потерям, что, в свою очередь, требует изменения экспонометрических параметров системы (увеличе-

ния эффективной выдержки затвора, повышения чувствительности сенсора или дополнительного усиления выходного сигнала). Это приводит к росту шумов в результирующем изображении, а также к смазам при фотографировании подвижных объектов или ведения съёмки с подвижных носителей.

Аддитивный способ регистрации изображений с большим интервалом яркости (способ вычитания) заключается в одновременном или последовательном экспонировании светочувствительного сенсора распределением освещённости, формирующем изображение объекта фотографирования и распределением освещённости, формирующем нерезкое негативное изображение того же объекта [7]. Двойное экспонирование позволяет сузить динамический диапазон регистрируемого оптического сигнала и снизить эффективную выдержку затвора, однако приводит к уменьшению контраста мелких деталей результирующего изображения.

Комбинированный способ регистрации изображения даёт возможность согласовать динамический диапазон регистрируемого оптического сигнала с динамическим диапазоном регистратора, минимизируя при этом влияние недостатков мультипликативного и аддитивного способов, используемых самостоятельно.

Постановка задачи

Целью данной статьи является оценка влияния комбинированного способа регистрации изображений объектов с большим диапазоном яркости на функцию рассеяния результирующего изображения.

Комбинированный способ регистрации изображений с большим диапазоном яркости

В комбинированном способе регистрации изображений, так же как и в мультипликативном способе, предусматривается использование установленной перед чувствительной площадкой сенсора регистратора частотно-избирательной фильтр-маски. При этом изображение фильтр-маски формируется для каждого конкретного кадра с помощью дополнительной системы (рис. 1) [8].

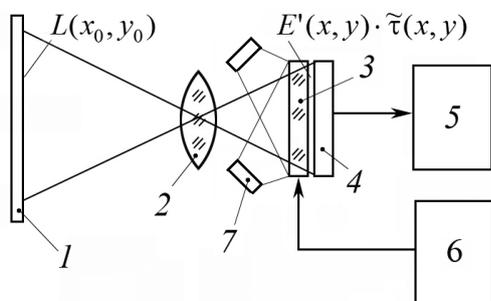


Рис. 1. Функциональная схема фоторегистратора, использующего комбинированный способ регистрации изображения

Распределение яркости $L(x_0, y_0)$ объекта фотографирования 1, спроецированное с помощью объектива 2 на светочувствительную площадку сенсора 4 регистратора 5, создаёт на нём распределение освещённости $E'(x, y) \cdot \tilde{\tau}(x, y)$, где (x, y) – координаты на фотографическом сенсоре и частотно-избирательной фильтр-маске, соответствующие координатам точки фотографируемого объекта (x_0, y_0) ; $\tilde{\tau}(x, y)$ – распределение коэффициента пропускания частотно-избирательной фильтр-маски

Распределение $\tilde{\tau}(x, y)$ является нерезкой маской, представляющей собой негативное изображение фотографируемого объекта. Маска строится с помощью дополнительной системы 6 на прозрачном элементе 3 из фотохромного материала непосредственно перед основным экспонированием. При этом, вместо фотохромного, может быть использован и другой материал, позволяющий оперативно получить требуемое пространственное распределение его коэффициента пропускания.

После срабатывания затвора (системы затворов), на светочувствительной площадке сенсора (слое фотоплёнки, элементах матрицы) формируется промежуточное изображение в виде действующих экспозиций:

$$H_M(x, y) = E'(x, y) \cdot t_{e1}(x, y) \cdot \tilde{\tau}(x, y) = \\ = E'(x, y) \cdot t_{e1}(x, y) \cdot \left(\frac{H_i}{\tilde{E}(x, y) \cdot t_{em}(x, y)} \right)^{g_M},$$

где $t_{e1}(x, y)$ – эффективная выдержка затвора (системы затворов) для элементарного участка с координатами (x, y) , $t_{em}(x, y)$ – эквивалентная эффективная выдержка для элементарного участка (x, y) при построении маски, H_i – точка инерции характеристической кривой фотохромного материала, g_M – градиент маски, определяемый характеристической кривой используемого фотохромного материала в рассматриваемой точке, $\tilde{E}(x, y)$ – распределение освещённости, создающее нерезкое изображение.

На данном этапе, реализация комбинированного способа регистрации изображения, не отличается от реализации мультипликативного способа.

После построения частотно избирательной фильтр-маски через неё производится дополнительное экспонирование чувствительной площадки сенсора от источника равномерной подсветки 7 с эквивалентной яркостью L_0 . Дополнительное экспонирование может быть осуществлено одновременно с основным экспонированием или после его окончания. В результате дополнительного экспонирования в течение времени $t_{e2}(x, y)$, фото-

графический сенсор (фотоплёнка) получает экспозицию $\tilde{H}_2(x, y)$. Распределение $\tilde{H}_2(x, y)$ является нерезким и негативным относительно изображения основного экспонирования.

$$\begin{aligned} \tilde{H}_2(x, y) &= E_{02} \cdot t_{e2}(x, y) \cdot \tilde{t}(x, y) = \\ &= E_{02} \cdot t_{e2}(x, y) \cdot \left(\frac{H_i}{\tilde{E}(x, y) \cdot t_{em}(x, y)} \right)^{g_M}, \end{aligned}$$

где E_{02} – освещённость, создаваемая на чувствительной площадке сенсора источником равномерной засветки при отсутствии маски, $t_{e2}(x, y)$ – эффективная выдержка в точке (x, y) при дополнительном экспонировании.

В результате двойного экспонирования на светочувствительную площадку сенсора действует экспозиция

$$\begin{aligned} H_\Sigma(x, y) &= H_M(x, y) + \tilde{H}_2(x, y) = \\ &= \frac{E(x, y) \cdot t_{e1}(x, y) + E_{02} \cdot t_{e2}(x, y)}{\left(\frac{\tilde{E}(x, y) \cdot t_{em}(x, y)}{H_i} \right)^{g_M}}, \end{aligned}$$

Таким образом, в комбинированном способе используются признаки как мультипликативного, так и аддитивного способов регистрации изображения [9].

Функция рассеяния результирующего изображения

Нерезкая маска перед фотографическим сенсором и пространственно-модулированное излучение дополнительного экспонирования, действуют как фильтр низких частот, оказывая влияние на градационные и частотные характеристики результирующего изображения.

Влияние процесса сжатия динамического диапазона оптического сигнала в низкочастотной области принято оценивать коэффициентом маскирования K_M :

$$K_M = \lg \left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}} \right) \cdot \left(\lg \left(\frac{H_{\max}}{H_{\min}} \right) \right)^{-1},$$

где L_{\max} , L_{\min} , H_{\max} , H_{\min} – максимальные и минимальные значения яркости L объекта фотографирования и экспозиции H в результирующем изображении данного объекта.

В статье [10] получено выражение, позволяющее рассчитать значение для коэффициента маскирования K_M при использовании комбинированного способа регистрации изображения при различных характеристиках изображения маски и параметров источника равномерной подсветки.

В работе [11] получено выражение, описывающее влияние комбинированного способа реги-

страции изображений с большим интервалом яркости на модуляционную передаточную функцию результирующего изображения:

$$T_\Sigma(\nu) = K_{\gamma 0}(\nu) \cdot T_{AM}(\nu) - T_{AFE}(\nu) \cdot g_M, \quad (1)$$

где

$$K_{\gamma 0}(\nu) = \frac{\lg(A) - \lg(B)}{\lg(1 + k_L(\nu)) - \lg(1 - k_L(\nu))}, \quad (2)$$

$$A = \frac{L_{cp0}(\nu)}{L_0} (1 + k_L(\nu)) + 1, \quad B = \frac{L_{cp0}(\nu)}{L_0} (1 - k_L(\nu)) + 1$$

$$L_{cp0}(\nu) = \frac{L_{\max 0}(\nu) + L_{\min 0}(\nu)}{2}, \quad (3)$$

$$k_L(\nu) = \frac{L_{\max 0}(\nu) - L_{\min 0}(\nu)}{L_{\max 0}(\nu) + L_{\min 0}(\nu)}, \quad (4)$$

где $T_{AM}(\nu)$ – общая модуляционная передаточная функция звеньев передачи информации от объекта фотографирования до светочувствительного сенсора; $T_{AFE}(\nu)$ – общая модуляционная передаточная функция звеньев передачи информации от объекта фотографирования до фотохромного элемента; g_M – градиент маски; L_{cp0} , $L_{\max 0}$, $L_{\min 0}$ – средняя, максимальная и минимальная яркости гармонического сигнала для пространственной частоты ν ; k_L – коэффициент модуляции для пространственной частоты ν .

Учитывая взаимосвязь между функцией рассеяния и частотной передаточной функцией системы [12], модулем которой является модуляционная передаточная функция, из выражений (1) - (4) легко получить выражение для функции рассеяния процесса локального управления экспозиции комбинированным методом:

$$h_\Sigma(\xi) = \frac{h_{AM}(\xi) \cdot K_{\gamma 0} - h_{AFE}(\xi) \cdot g_M}{K_{\gamma 0} - g_M},$$

где $h_{AM}(\xi)$ – функция рассеяния линии основного канала формирования изображения, $h_{AFE}(\xi)$ – функция рассеяния линии канала формирования изображения маски.

График зависимости коэффициента $K_{\gamma 0}$ от относительного уровня дополнительного экспонирования участка кадра при различных значениях контраста деталей объекта приведен в работе [11].

Влияние параметров процесса регистрации изображения комбинированным способом на функцию рассеяния результирующего изображения проиллюстрировано фотографиями [11] и графиками, приведенными на рис. 2 – рис. 6.

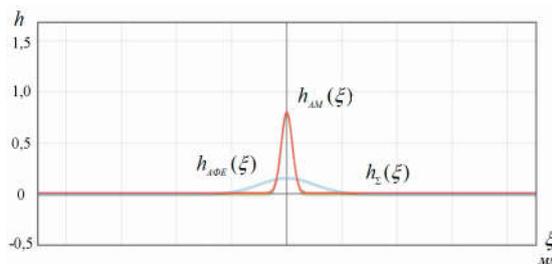


Рис. 2. Параметры процесса регистрации изображения комбинированным способом:
 $K_{\gamma_0} = 0,8, K_M = 1, g_M = 0$ (без фильтр-маски)

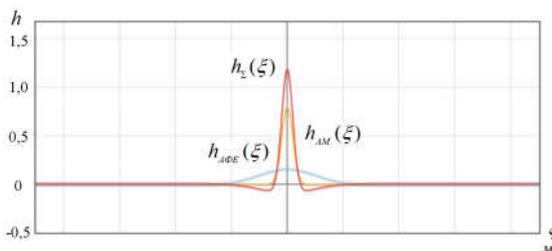


Рис. 3. Параметры процесса регистрации изображения комбинированным способом:
 $K_{\gamma_0} = 0,8, K_M > 1, K_{\gamma_0} > g_M > K_{\gamma_0} - 1$

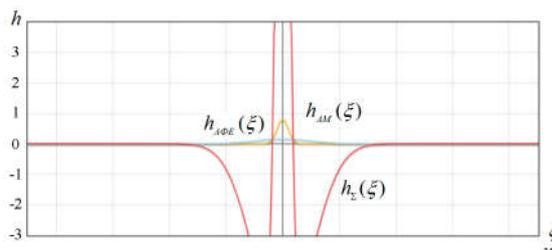


Рис. 4. Параметры процесса регистрации изображения комбинированным способом:
 $K_{\gamma_0} = 0,8, K_M \approx \infty, g_M \approx K_{\gamma_0}$

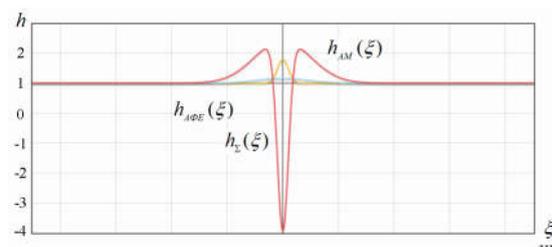


Рис. 5. Параметры процесса регистрации изображения комбинированным способом:
 $K_{\gamma_0} = 0,8, K_M < 0, g_M > K_{\gamma_0}$

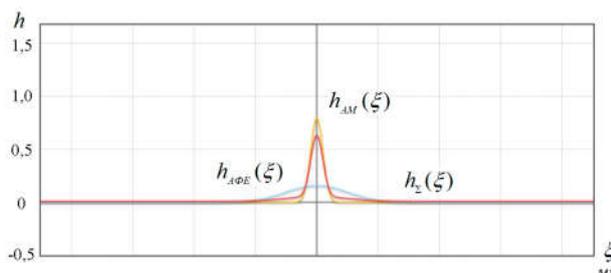


Рис. 6. Параметры процесса регистрации изображения комбинированным способом:
 $K_{\gamma_0} = 0,8, 0 < K_M < 1, g_M < K_{\gamma_0} - 1$

Процесс регистрации изображений объектов с большим диапазоном яркости комбинированным способом оказывает существенное влияние на функцию рассеяния результирующего изображения. При коэффициенте маскирования $K_M=1$ сжатие динамического диапазона входного сигнала отсутствует. При $1 < K_M$ снижается контраст низкочастотных составляющих спектра сигнала, что приводит к появлению отрицательной части функции рассеяния результирующего изображения. Случаю $K_M \approx \infty$ соответствует полное выравнивание интенсивности низкочастотных составляющих спектра оптического сигнала. При отрицательных значениях K_M имеют место отрицательные значения центральной части функции рассеяния, что соответствует реверсу контрастов на низких пространственных частотах.

Выводы

Получено выражение для функции рассеяния результирующего изображения, сформированного с использованием комбинированного способа регистрации изображений объектов фотографирования с большим диапазоном яркости.

Проанализировано влияние параметров процесса регистрации изображения комбинированным способом на функцию рассеяния результирующего изображения

Выражение может быть использовано при проведении теоретических исследований влияния процесса комбинированного способа регистрации изображений на эффективность съёмки.

В дальнейшем планируется проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния комбинированного способа регистрации изображений с большим диапазоном яркости на краевую функцию результирующего изображения.

Література

- [1] G. Eilertsen, J. Kronander, G. Denes, R. Mantiuk, J. Unger, "HDR Image Reconstruction From a Single Exposure Using Deep CNNs", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 36, No. 6, p. 178:1-178:15, 2017.
- [2] F. Banterle, A. Artusi, K. Debattista, A. Chalmers, *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. New York: AK Peters, 2011.

- [3] В. Г. Колобродов, Д. О. Півторак, "Комбінований спосіб реєстрації зображення об'єкта з широким динамічним діапазоном яскравостей", *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*, № 4, с. 97-101, 2009.
- [4] А. П. Подолян, С. В. Пудрий, А. Н. Румянцев, "О влиянии локального управления экспозицией методом двойного экспонирования на эффективность воздушного фотографирования", *Прикладные вопросы аэрокосмического мониторинга*, № 1, с. 101-107, 1997.
- [5] С. В. Пудрий, А. П. Подолян, "Вплив локального керування експозицією методом подвійного експонування на ефективність повітряного фотографування", *Збірник наукових праць КИВВС / Повітряна розвідка*, с. 52-58, 1998.
- [6] Х. Фризер, *Фотографическая регистрация информации*, Москва, СССР: Мир, 1978.
- [7] Дж. М. Ллойд, *Системы тепловидения*: Пер. с англ., Москва, СССР: Мир, 1978.
- [8] В. Г. Колобродов, Д. О. Півторак, С. В. Пудрий, Ю. К. Ребрин, "Спосіб фотозйомки й пристрій для його здійснення", *МПК G03 7/08, Пат. 87415 України*, опубл. 10.07.2009, Бюл. №13.
- [9] А. П. Подолян, "Сжатие динамического диапазона яркости аэроландшафта при аэрофотографировании", *Научно-методические материалы по современным методам проектирования авиационных автоматических систем*, №1, с. 94-98, 1989.
- [10] Д. А. Пивторак, "Оценка связи коэффициента маскирования с параметрами процесса локального управления экспозиции комбинированным способом", *Вестник Инженерной академии Украины*, № 4, с. 239-243, 2016.
- [11] Д. А. Пивторак, "Влияние комбинированного способа регистрации изображений объектов с большим диапазоном яркости на модуляционную передаточную функцию результирующего изображения", *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, № 57 (1), с. 26-35, 2019.
- [12] Н. Н. Красильников, *Статистическая теория передачи изображений*. Москва, СССР: Связь, 1976.

УДК 621.384.3

Д. А. Півторак

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ РЕЄСТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ З ВЕЛИКИМ ДІАПАЗОНОМ ЯСКРАВОСТІ НА ФУНКЦІЮ РОЗСІЯННЯ РЕЗУЛЬТУЮЧОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

При реєстрації зображення об'єктів з великим інтервалом яскравості в межах кадру, керування експозицією повинно здійснюватися для кожної елементарної ділянки кадру. У відомих реєстраторах, які оснащені експонетричними пристроями, які здійснюють таке керування, використовуються мультиплікативний, адитивний та комбінований способи реєстрації зображення.

Використання мультиплікативного способу приводить до значних енергетичних втрат в оптичному каналі, що вимагає зміни експонетричних параметрів системи (збільшення ефективної витримки затвору, підвищення чутливості сенсора або додаткового підсилення вихідного сигналу). Використання адитивного способу дозволяє звузити динамічний діапазон оптичного сигналу, що реєструється, та знизити ефективну витримку затвора, однак призводить до зниження контрасту дрібних деталей результуючого зображення.

Застосування комбінованого способу дозволяє подати малоінформативні низькочастотні складові спектру вхідного сигналу, зменшити при цьому втрати від зсуву зображення та зменшити контраст зображень дрібних деталей. Використання комбінованого способу дає можливість узгодити динамічний діапазон оптичного сигналу, що реєструється, з динамічним діапазоном реєстратора, мінімізуючи при цьому вплив недоліків мультиплікативного та адитивного способів, що використовуються самостійно.

В статті отримано вираз для функції розсіювання процесу реєстрації зображення об'єктів фотографування з великим діапазоном яскравості комбінованим способом. Проаналізовано вплив параметрів процесу реєстрації зображення комбінованим способом на функцію розсіювання результуючого зображення.

При коефіцієнті маскувння $K_M=1$ має місце відсутність стиснення динамічного діапазону вхідного сигналу. При $1 < K_M$ знижується контраст низькочастотних складових спектра сигналу, що приводить до появи від'ємної частини функції розсіювання результуючого зображення. Випадку $K_M \approx \infty$ відповідає повне вирівнювання їх інтенсивності низькочастотних складових спектра оптичного сигналу. При негативних значеннях K_M мають місце негативні значення центральної частини функції розсіювання, що відповідає реверсу контрастів на низьких просторових частотах.

Вираз може бути використано при проведенні теоретичних досліджень впливу процесу комбінованого способу реєстрації зображень на ефективність зйомки.

Ключові слова: функція розсіювання; динамічний діапазон; зображення.

D. O. Pivtorak

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

THE EFFECT OF THE MULTIFUNCTION METHOD OF REGISTERING IMAGES OF OBJECTS WITH A LARGE RANGE OF BRIGHTNESS ON THE SCATTERING FUNCTION OF THE RESULTING IMAGE

When registering images of objects with large range of brightness within the frame, exposure control should be performed for each elementary area of the frame. In well-known recorders, which are equipped with exposure devices that perform such control, multiplicative, additive and multifunction methods of image registration are used.

The use of the multiplicative method leads to significant energy losses in the optical channel, which requires in the exponential parameters of the system (increase the effective shutter speed, increase the sensitivity of the sensor or additional amplification of output signal). The use of the additive method allows to narrow the dynamic range of the recorded optical signal and to reduce the effective shutter speed, but reduces the contrast of small images of the resulting image. The use of the multifunction method allows to suppress low-informative low-frequency components of the spectrum of the input signal, while reducing losses from image shift and reduce the contrast of images of small details.

The use of the multifunction method allows to suppress low-informative low-frequency components of the spectrum of the input signal, while reducing losses from image shift and reduce the contrast of images of small details. The use of the multifunction method makes it possible to match the dynamic range of the recorder optical signal with the dynamic range of the recorder, while minimizing the impact of the disadvantages of the multiplicative and additive methods used independently.

An expression for the scattering function of the image registration process of objects with a large range of brightness using the multifunction method is obtained. The influence of the parameters of the image registration process using the multifunction method on the scattering function of the multifunction image is analyzed.

With the masking coefficient $K_M=1$, there is no compression of the dynamic range of the input signal. When $1 < K_M$ the contrast of low-frequency components of the signal spectrum is reduced, which leads to the appearance of a negative part of the scattering function of the resulting image. The case $K_M \approx \infty$ corresponds to a full equalization of their intensity. At negative values K_M , there are negative values of the central part of the scattering function, which corresponds to the reverse of contrasts at low spatial frequencies.

The expression can be used when conducting theoretical studies of the effect of the process of the multifunction method of registering images on the shooting efficiency.

Keywords: scattering function; dynamic range; image.

*Надійшла до редакції
12 травня 2020 року*

*Рецензовано
25 травня 2020 року*