

3. Колобродов В. Г. Проективання дифракційних оптичних елементів і систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 196 с.
4. Lou D. Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum / D. Lou, J. Bai, X. Hou, G. Yang // Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II. – 2005. – Vol. 5636. – P. 78 – 85.
5. Reichelt S. Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays / S. Reichelt, H. Sahm, N. Leister, A. Schwerdtner // Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications. – 2008. – Vol. 6912. – P. 69120 – 69130.
6. Сокурєнко В. М. Око людини та офтальмологічні прилади: навч. посіб. / В. М. Сокурєнко, Г. С. Тимчик, І. Г. Чиж. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – 264 с.

*Надійшла до редакції  
20 лютого 2015 року*

© Колобродов В. Г., Кучугура І. О., Сірий Є. А., 2015

УДК 621.384.3

## **ВЫБОР ЭКСПОЗИЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОАППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Колобродов В. Г., Пивторак Д. А.*

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,  
г. Киев, Украина  
E-mail: [p\\_diana@i.ua](mailto:p_diana@i.ua)*

*Для снижения информационных потерь при фотосъемке в условиях большого интервала яркости в пределах кадра, используются мультипликативный, аддитивный и комбинированный способы регистрации изображений.*

*При комбинированном способе регистрации изображений проводится экспонирование светочувствительного сенсора через заранее построенную частотно избирательную фильтр-маску оптического изображения объекта фотографирования и изображения экрана равномерной яркости.*

*Получено выражение, позволяющее определить значения регулирующих экспозицию параметров, обеспечивающих получение изображения с заданной интегральной экспозицией кадра, учитывающее яркостные характеристики объекта фотографирования, экрана и характеристики маски. Выражение может быть положено в основу работу экспонометрической системы с локальным управлением экспозиции в фотоаппаратах, использующих комбинированный способ регистрации изображений.*

**Ключевые слова:** *изображение, экспозиция, динамический диапазон.*

### **Введение**

Для снижения потерь информации, вызванных несоответствием динамического диапазона входного сигнала (интервала яркости объектов фотографирования) динамическому диапазону регистратора изображения, в современных фотокамерах широко используется предварительная пространственно-частотная фильтрация оптического сигнала. Функции простейших фильтров обычно выполняют экспонометрические устройства, обеспечивающие подавление низких пространственных частот изображения, в основном не несущих по-

лезной информации. При съёмке в условиях большого интервала яркостей в пределах кадра, экспонетрические устройства должны обеспечивать управление экспозицией каждого элементарного участка кадра, то есть, обеспечивать локальное управление экспозицией. В фотоаппаратах, оснащённых известными экспонетрическими устройствами с локальным управлением экспозицией используется мультипликативный, аддитивный или комбинированный способ регистрации изображений [1].

Использование мультипликативного способа (способа нерезкого маскирования) [2] приводит к энергетическим потерям в оптическом канале, что требует коррекции регулирующих экспозицию параметров. Увеличение светочувствительности ведёт к росту шумов, а увеличение эффективной выдержки к появлению смазов при съёмке с подвижных носителей. Использование же аддитивного способа (способа вычитания) [3] даёт возможность уменьшить эффективную выдержку затвора, но приводит к снижению контраста мелких изображений.

### **Постановка задачи**

Применение комбинированного способа регистрации изображений позволит подавить малоинформативные низкочастотные составляющие спектра входного сигнала, снизив при этом потери от смаза изображения и уменьшения контраста изображений мелких деталей. Для получения качественных изображений комбинированным способом, требуется проведение экспонетрических расчётов, учитывающих как энергетические потери за счёт нерезкой маски, так и получение дополнительной энергии за счёт двойного экспонирования.

Целью данной статьи является получение экспонетрической формулы, определяющей работу экспонетрической системы локального управления экспозиции в фотоаппаратах, использующих комбинированный способ регистрации изображений объектов с большим диапазоном яркости.

### **Комбинированный способ регистрации изображений с большим диапазоном яркости**

Реализация комбинированного способа регистрации изображений предполагает установку перед светочувствительным сенсором управляемой пространственно-частотной фильтр-маски [4, 5]. С помощью объектива фотоаппарата распределение яркости фотографируемого объекта  $L(x_0, y_0)$  проецируется на светочувствительный сенсор, создавая на нём (при отсутствии фильтр-маски) распределение освещённости  $E'(x, y)$ , где  $(x, y)$  – координаты на фотографическом сенсоре и частотно-избирательной фильтр-маске, соответствующие координатам точки фотографируемого объекта  $(x_0, y_0)$ . Если установлен пространственно-частотный фильтр, то освещённость на светочувствительном сенсоре будет зависеть и от его коэффициента пропускания  $\tilde{\tau}(x, y)$  в рассматриваемой точке  $E'(x, y) \cdot \tilde{\tau}(x, y)$ . Распределение  $\tilde{\tau}(x, y)$  является нерезкой маской, представляющей собой негативное изображение фотографируемого объекта. В качестве но-

сителя для построения маски может быть использован элемент из фотохромного материала. После отработки затвором эффективной выдержки  $t_{e1}(x, y)$  (которая в общем случае может быть не одинаковой по полю снимка), в светочувствительных элементах (слое) фотографического сенсора (фотоплёнки) будет сформировано промежуточное изображение в виде действующих экспозиций:

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

где  $t_{em}(x, y)$  – эквивалентная эффективная выдержка в точке  $(x, y)$  при построении маски;  $g$  – градиент характеристической кривой используемого фотохромного материала в рассматриваемой точке;  $\tilde{E}(x, y)$  – распределение освещённости, создающее нерезкое изображение.

По существу, на первом этапе, полученные результаты аналогичны результатам применения мультипликативного способа регистрации изображения.

После получения промежуточного изображения, производится дополнительное экспонирование сенсора через уже построенную маску от источника равномерной подсветки, в результате чего фотографический сенсор (фотоплёнка) получает дополнительную экспозицию  $\tilde{H}_2(x, y)$ . Данное распределение экспозиций, по существу, является нерезким изображением, негативным по отношению к основному. То есть, на втором этапе комбинированного способа используются признаки аддитивного способа регистрации изображения:

$$\tilde{H}_2(x, y) = E_{02} \cdot \tilde{\tau}(x, y) \cdot t_{e2}(x, y) = \frac{E_{02}}{\tilde{E}(x, y)^g} \cdot H_i^g \cdot \frac{t_{e2}(x, y)}{t_{em}(x, y)^g},$$

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

В результате двойного экспонирования на светочувствительные элементы (слой) сенсора (фотоплёнки) действует экспозиция:

$$H_\Sigma(x, y) = H_M(x, y) + \tilde{H}_2(x, y).$$

Таким образом, комбинированный способ регистрации изображений включает в себя как элементы мультипликативного, так и аддитивного способов.

### Вывод экспонетрического уравнения при комбинированном способе регистрации изображений

Процесс сжатия динамического диапазона входного сигнала при комбинированном способе локального управления экспозиции характеризуется коэффициентом маскирования, который может быть определён из выражений

$$K_M = \frac{1}{K_\gamma - \gamma \cdot \gamma_{ОЕК}},$$

где

$$K_{\gamma} = \frac{\lg\left(\frac{L_{\max} + L_0}{L_{\min} + L_0}\right)}{\lg \Delta_L}, \quad (1)$$

$\gamma \cdot \gamma_{OЕК}$  – коэффициент контрастности изображения маски;  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  – максимальная и минимальная яркости низкочастотных деталей снимаемого объекта;  $L_0$  – яркость условного объекта (площадка равномерной яркости в пределах кадра);  $\lg \Delta_L = \lg\left(\frac{L_{\max}}{L_{\min}}\right)$  – диапазон яркости в пределах кадра.

В случае управления экспозиции по яркости сюжетно важного участка объекта фотографирования, без использования процесса локального управления экспозиции, экспонометрическая система фотоаппарата решает экспонометрическое уравнение в виде:

$$E_{\delta 1} \cdot t_e = \frac{K_{кр}}{S_{кр}}, \quad (2)$$

где  $E_{\delta 1}$  – освещённость на светочувствительном сенсоре, создаваемая яркостью сюжетно важного участка фотографируемого объекта  $L_{\delta 1}$ ;  $t_e$  – эффективная выдержка затвора фотоаппарата;  $S_{кр}$  – светочувствительность сенсора по заданному критерию;  $K_{кр}$  – критериальный коэффициент определения светочувствительности.

Освещённость изображения сюжетно важного участка фотографируемого объекта на светочувствительном сенсоре  $E_{\delta 1}$ , при известных допущениях для центральной части кадра, связана с его яркостью  $L_{\delta 1}$  простым соотношением:

$$E_{\delta 1} = \frac{\pi}{4} \cdot L_{\delta 1} \cdot \tau_{oc} \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^2, \quad (3)$$

где  $\tau_{oc}$  – коэффициент пропускания оптического канала от объекта до сенсора;  $K$  – диафрагменное число объектива [6].

В случае, если управление экспозиции осуществляется путём изменения только одного параметра (например, выдержки), выражение (2) с учётом (3) может быть представлено в виде:

$$t_e = K_{к},$$

где

$$K_{к} = \frac{K_H \cdot K^2}{L_{\delta 1} \cdot S_{кр}},$$

где  $K_H = \left(\frac{4 \cdot K_{кр}}{\pi \cdot \tau_{oc}}\right)$  – экспонометрический коэффициент.

Экспонометрическое выражение (2) может быть представлено в логарифмическом виде:

$$\log_2 \left( \frac{K^2}{t_e} \right) = \log_2(S_{\text{кр}}) + \log_2(L_{\delta 1}) - \log_2(K_H) \pm \log_2(K_{EK}),$$

где  $\pm \log_2(K_{EK})$  – коэффициент экспокоррекции, позволяющий скорректировать критериальный уровень экспозиции, соответствующий заданной светочувствительности.

Наличие частотно-избирательной фильтр-маски снижает среднюю освещённость светочувствительного сенсора, что требует, увеличения эффективной выдержки затвора или светочувствительности для получения нормально экспонированных кадров. Увеличение выдержки повышает вероятность смаза при съёмке с подвижных носителей, а увеличение светочувствительности ведёт к росту шумов в изображении. И то, и другое приводит к снижению разрешающей способности системы. Поэтому наиболее тёмным деталям изображения должна соответствовать минимально возможная оптическая плотность изображения маски, а в случае построения маски на фотохромном элементе – оптическая плотность, соответствующая началу прямолинейного участка характеристической кривой используемого материала. Следовательно, оптико-электронная система впечатывания маски должна проводить выбор экспозиционных параметров по минимальной яркости фотографируемого объекта. При корректной работе системы впечатывания маски, в ходе лучей, формирующих фрагмент изображения объекта с минимальной яркостью, коэффициент пропускания маски будет равен  $\tau_{\max}$ , а с максимальной –  $\tau_{\min}$ .

При этом

$$\tau_{\max} = 10^{-D_{\min}} = 10^{-D_{N\Phi}},$$

где  $D_{N\Phi}$  – оптическая плотность изображения маски, соответствующая начальному участку характеристической кривой фотохромного материала.

Очевидно, что при съёмке сюжета с диапазоном яркостей  $\lg \Delta_L$ , минимальный коэффициент пропускания маски будет равен:

$$\tau_{\min} = \tau_{\max} \cdot 10^{-(D_{\max} - D_{\min})} = \tau_{\max} \cdot 10^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК} \cdot \lg \Delta_L} = \tau_{\max} \cdot \Delta_L^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}},$$

а средний коэффициент пропускания маски:

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{\min} + \tau_{\max}}{2} = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\max} \cdot \Delta_L^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}}}{2} = \frac{\tau_{\max}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\Delta_L^{\gamma \cdot \gamma_{OЕК}}} \right). \quad (4)$$

При проведении технической и аэрофотосъёмки чаще всего используется управление экспозиции по интегральной яркости объектов в пределах кадра или его сюжетно важной части. Для дальнейшего вывода следует отметить отличия между средним значением яркости в пределах кадра и его интегральным значением, которые определяются формой закона распределения яркости в пределах кадра. В связи с этим, выражение (4) может быть использовано только в частных случаях, например, равномерного или симметричного относительно среднего значения закона распределения яркостей.

В реальных условиях, для определения интегрального коэффициента пропускания маски, в расчётах необходимо использовать данные об интегральной яркости фотографируемого объекта  $L_I$  и отношением величины интегральной яркости к её минимальному значению в пределах кадра:

$$\Delta_{L-\min} = \frac{L_I}{L_{\min}}. \quad (5)$$

В этом случае, интегральный коэффициент пропускания маски в пределах кадра будет равен:

$$\tau_I = \tau_{\max} \cdot 10^{-(D_I - D_{\min})} = \tau_{\max} \cdot 10^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК} \cdot \lg \Delta_{L-\min}} = \tau_{\max} \cdot \Delta_{L-\min}^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}}.$$

Кроме того, при комбинированном способе регистрации изображения, интегральная экспозиция светочувствительного сенсора увеличивается за счёт дополнительного экспонирования на некоторую интегральную величину

$$E_{0I} = E_0 \cdot \tau_I = E_0 \cdot \tau_{\max} \cdot \Delta_{L-\min}^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}}, \quad (6)$$

где  $E_0$  – освещённость, создаваемая на светочувствительном сенсоре источником дополнительного экспонирования при отсутствии маски:

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \cdot L_0 \cdot \tau_{oc} \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^2, \quad (7)$$

где  $L_0$  – эквивалентная яркость источника дополнительного излучения, то есть, яркость, численно равная средней яркости объекта фотографирования, которая создавала бы на светочувствительном сенсоре среднюю освещённость  $E_0$ .

С учётом (6) и введением замены  $E_{\delta I} = E_I$ , базовое экспонетрическое уравнение (2) примет вид:

$$(E_I + E_0) \cdot \tau_{\max} \cdot \Delta_{L-\min}^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}} \cdot t_e = \frac{K_{кр}}{S_{кр}},$$

или, с учётом (3) и (7):

$$(L_I + L_0) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \tau_{oc} \cdot \left(\frac{1}{K}\right)^2 \cdot \tau_{\max} \cdot \Delta_{L-\min}^{-\gamma \cdot \gamma_{OЕК}} \cdot t_e = \frac{K_{кр}}{S_{кр}}, \quad (8)$$

при использовании монохромного светочувствительного сенсора и светофильтра, в экспонетрических расчётах вместо  $S_{кр}$  подставляется значение эффективной светочувствительности:

$$S_{eff} = \frac{S_{кр}}{q},$$

где  $q$  – кратность светофильтра.

С учётом этого, выражение (8) примет вид:

$$\frac{t_e}{K^2} = \frac{4 \cdot K_{кр} \cdot q \cdot \Delta_{L-\min}^{\gamma \cdot \gamma_{OЕК}}}{\pi \cdot S_{кр} (L_I + L_0) \cdot \tau_{oc} \cdot \tau_{\max}},$$

или, с учётом экспонетрического коэффициента  $K_{HK} = \left( \frac{4 \cdot K_{\kappa p}}{\pi \cdot \tau_{oc} \cdot \tau_{max}} \right)$  и коэффициента экспокоррекции  $\pm \log_2(K_{EK})$ :

$$\frac{t_e}{K^2} = \frac{K_{HK} \cdot q \cdot \Delta_{L-\min}^{\gamma \cdot \gamma_{OEK}} \cdot K_{EK}}{S_{\kappa p} \cdot (L_I + L_0)}$$

Для удобства  $L_I$  может быть вынесено за скобки:

$$\frac{t_e}{K^2} = \frac{K_{HK} \cdot q \cdot K_{EK}}{S_{\kappa p} \cdot L_I \cdot \left( 1 + \frac{L_0}{L_I} \right) \Delta_{L-\min}^{\gamma \cdot \gamma_{OEK}}} \quad (9)$$

Экспонетрическое уравнение, учитывающее влияние комбинированного способа локального управления экспозиции (9), может быть записано в более удобном логарифмическом виде:

$$\log_2 \left( \frac{K^2}{t_e} \right) = EV,$$

где  $EV$  – экспозиционное число:

$$EV = \log_2(S_{\kappa p}) + \log_2(L_I + L_0) - \log_2(\Delta_{L-\min}^{\gamma \cdot \gamma_{OEK}}) - \log_2(K_{HK} \cdot q) \pm \log_2(K_{EK}).$$

При этом, с учётом (14), выражение (5) может быть преобразовано к виду

$$K_{\gamma} = \log_{\Delta_L} \left( \frac{\left( \frac{L_I \cdot (\Delta_L + 1)}{L_0 \cdot \Delta_{L-\min}} + 1 \right) \cdot \Delta_L + 1}{\frac{L_I \cdot (\Delta_L + 1)}{L_0 \cdot \Delta_{L-\min}} + \Delta_L + 1} \right).$$

Выражение (9) является основной экспонетрической формулой, определяющей работу экспонетрической системы с локальным управлением экспозиции комбинированным способом (для центра кадра).

Таким образом, выбор экспозиционных параметров фотоаппарата, использующего комбинированный способ регистрации изображений, требует измерение закона распределения яркости объекта фотографирования с вычислением его интегральной яркости и диапазона яркости в пределах кадра, знание эквивалентной яркости источника дополнительного экспонирования и коэффициента контрастности изображения пространственно-частотной фильтр-маски.

Выражение может быть использовано для расчёта экспозиционных параметров при проведении теоретических исследований влияния процесса комбинированного способа регистрации изображений на эффективность съёмки. При расчётах следует учитывать программу работы экспонетрической системы [7].

В подавляющем большинстве случаев в фотоаппаратах, предназначенных для работы с подвижных носителей (например, в аэрофотоаппаратах) принята следующая очерёдность отработки регулирующих экспозицию органов: при

увеличении яркости объекта фотографирования, для поддержания средней экспозиции на заданном уровне, сначала сокращается выдержка, а затем, после достижения ей минимального значения, уменьшается диафрагменное отверстие и наоборот [7, 8]. Очередность позволяет снизить потери из-за смазов, которые ввиду погрешностей работы систем компенсации сдвига изображения в основном превышают потери от неоптимального диафрагмирования.

Вместе с тем, в цифровых фотоаппаратах наряду с выдержкой и диафрагмой простыми методами может изменяться и светочувствительность, что в ряде случаев может быть более эффективным.

### **Вывод**

Получена экспонетрическая формула, которая позволяет управлять работой экспонетрической системы с локальным управлением экспозиции в фотоаппаратах, использующих комбинированный способ регистрации изображений. Это дает возможность регистрировать изображение объектов с большим диапазоном яркости.

В дальнейшем планируется проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния комбинированного способа регистрации изображений с большим диапазоном яркости на эффективность съемки.

### **Литература**

1. Колобродов В. Г. Комбінований спосіб реєстрації зображення об'єкта з широким динамічним діапазоном яскравостей / В. Г. Колобродов, Д. О. Півторак // Наукові вісті НТУУ «КПІ»: зб. ст. / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2009. – № 4. – С. 97 – 101.
2. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. – М.: Мир, 1978. – 672 с.
3. Ллойд Дж. М. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
4. Пат. 2383911 Российской Федерации, МКП G03 7/08, G03 19/08. Способ фотосъемки и устройство для его осуществление / В. Г. Колобродов, Д. А. Подолян, С. В. Пудрий, Ю. К. Ребрин; заявитель та патентообладатель «НПП КиАТОН». – №2008121008/28; заявл. 28.05.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. №7.
5. Пат. 87415 України, МПК G03 7/08. Спосіб фотозйомки й пристрій для його здійснення / В. Г. Колобродов, Д. О. Півторак, С. В. Пудрій, Ю. К. Ребрин; заявник та патентовласник «НПП КиАТОН». – №а200805221; заявл. 22.04.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. №13.
6. ГОСТ 17175-82 Объективы фотографические, киносъёмочные и телевизионные съёмочные. Ряды числовых значений относительных отверстий. – М.: Изд. стандартов, 1982. – 5 с.
7. Подолян А. П. Экспонетрические системы аэрофотоаппаратов / А. П. Подолян, С. В. Пудрий. – Киев: КИ ВВС, 1994. – 164 с.
8. Подолян А. П. Математическая модель процесса формирования изображения в аэрофотоаппаратах, оснащённых системами сжатия динамического диапазона яркости аэроландшафта / А. П. Подолян, А. И. Петрук, С. В. Пудрий // Некоторые вопросы получения и обработки данных воздушной разведки: сб. ст. / Киевский институт военно-воздушных сил. – Киев, 1993. – С. 9 – 14.

*Надійшла до редакції  
25 березня 2015 року*

© Колобродов В. Г., Пивторак Д. А., 2015