

Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены

Н.Н. Евтихийев¹, А.В. Козлов¹, В.В. Краснов¹, В.Г. Родин¹, Р.С. Стариков¹, П.А. Черёмхин¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Аннотация

Широкое использование фото- и видеокамер для научных и производственных применений, а также в бытовых условиях привело к необходимости оперативного определения их характеристик для оценки применимости в конкретной задаче. В большинстве случаев информация о шумах фотосенсора представлена неполно или отсутствует даже в паспортах специализированных научных цифровых камер, что делает задачу нахождения шумов актуальной. В работе предложен метод измерения основных шумовых характеристик фотосенсоров цифровых камер: световых и темновых временных шумов, неоднородностей фоточувствительности пикселей и темнового сигнала. Метод включает съемку только 2 кадров одной сцены, состоящей из нескольких полос (квазиоднородных областей) различной яркости, по которым далее рассчитываются шумы исследуемой камеры после программной сегментации по уровням сигналов. Экспериментальная апробация проводилась при использовании цифровых камер различного назначения и с различным устройством сенсора. Предложенный метод позволяет определить все основные шумовые характеристики фотосенсоров и не уступает по скорости и точности другим оперативным методам оценки шумов (которые, как правило, не дают полной информации о шумах). Значения характеристик шума, полученные с его помощью, соответствуют в пределах погрешности измеренным с помощью времязатратного стандартного метода.

Ключевые слова: цифровые камеры; фотосенсоры; цифровая обработка изображений; сегментация изображений; дробовой шум; неоднородность фоточувствительности.

Цитирование: Евтихийев, Н.Н. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены / Н.Н. Евтихийев, А.В. Козлов, В.В. Краснов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черёмхин // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 267-276. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-815.

Citation: Evtikhiev NN, Kozlov AV, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target. Computer Optics 2021; 45(2): 267-276. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-815.

Введение

В настоящее время цифровые фото- и видеокамеры являются незаменимыми элементами как в любительских [1], так и в научных и коммерческих задачах: в астрономии [2], экологии и анализе окружающей среды [3], медицине, в том числе микроскопии [4] и диагностике [5], цифровой голографии и реализации дифракционных оптических элементов [6], интерферометрии, в том числе при анализе микросмещений [7], в характеризации оборудования, в том числе для задач распознавания информации [8], в оптическом кодировании [9] и др. Для учёта возможностей использования конкретной камеры для решения подобных задач необходимо знать не только её технические характеристики, но и другие – в первую очередь шумовые. К числу основных шумовых характеристик камеры относятся: темновой (неоднородность темнового сигнала, dark signal non-uniformity DSNU) и световой (неоднородность фоточувствительности, photo response non-uniformity PRNU) пространственные составляющие шумов,

темновая составляющая временного шума, световой временной шум с построением кривой его зависимости от сигнала и оценкой константы пересчёта числа генерируемых электронов в цифровые единицы [10]. Однако большинство производителей даже в случае научных камер не указывают всех или значительной части некоторых из перечисленных характеристик. Зная шумы камеры, можно предпринять действия для уменьшения их влияния на изображение и увеличить отношение сигнал/шум посредством цифровой обработки [11–12].

Стандартные и наиболее точные методы для выполнения характеризации камеры (например, по стандарту EMVA 1288 [10]) подразумевают получение серий световых снимков на разных уровнях освещённости и серии темновых кадров. В зависимости от необходимой точности, серии снимков могут содержать разное количество кадров, минимально возможное число которых в каждой серии равно двум. При этом кривая зависимости временных шумов от сигнала по стандарту требует наличия не менее пятидесяти точек, распределённых по всем возможным уровням сигнала

фотосенсора. В результате для удовлетворения минимальных требований стандарта необходимо снять не менее сотни кадров различных равномерных сцен и далее провести их численную обработку.

Для ускорения нахождения шумовых характеристик фотосенсоров были предложены методы, позволяющие определять шумы по одному [13–15] или нескольким снимкам [10, 16–18]. Однако обычно такие методы не позволяют найти все шумовые характеристики.

Таким образом, целью работы было создание метода нахождения как временных, так и пространственных шумов фотосенсоров камер при малых временных затратах.

1. Анализ шумовых характеристик фотосенсоров камер

Шумы сенсоров цифровых фото- и видеокамер делят на две составляющие: временную и пространственную [19]. Временная составляющая связана со случайными флуктуациями внешних факторов, в свою очередь, пространственные шумы связаны с внутренними неоднородностями системы фотосенсора. Временная и пространственная составляющие разделяются на два блока: световые и темновые. Световые шумы проявляются только при освещении фотосенсора, а темновые – как при освещении, так и без него (с закрытой крышкой фоторегистратора), т.е. не связаны с регистрацией светового сигнала.

К причинам темнового временного шума относятся шум чтения, тепловая эмиссия, темновой ток и др. Основной причиной светового временного шума является неодинаковое количество фотонов, попадающих в ячейку фотосенсора в единицу времени, т.е. флуктуации потока фотонов, в результате чего этот эффект называется дробовым фотонным шумом. Дробовой шум хорошо аппроксимируется распределением Пуассона, поэтому его среднеквадратическое отклонение (СКО) зависит от сигнала по корневому закону [20].

Световой пространственный шум проявляется как различие фоточувствительности пикселей, а темновой пространственный – как постоянное отличие темнового сигнала по пикселям в отсутствие экспозиции. Причиной флуктуаций данных параметров от пикселя к пикселю являются малые различия характеристик пикселей, в частности различия доли светочувствительной области (fill-factor) [19]. Для характеристики светового пространственного шума вводится усреднённый показатель PRNU, являющийся процентным отклонением сигнала от среднего по сенсору при регистрации одной и той же яркости. СКО пространственного светового шума является линейной функцией от сигнала с тангенсом угла наклона, равным коэффициенту PRNU. Величину темнового пространственного шума принято характеризовать коэффициентом DSNU, являющимся аналогом PRNU, но рассчитываемым при отсутствии освещения. Величина DSNU считается не в процентном соотно-

шении, а в цифровых единицах сигнала (цифр.ед., digital numbers, DN), так как является значением пространственных шумов для одного (минимального) уровня сигнала. Поэтому СКО темнового пространственного шума равняется DSNU.

Полный шум фотосенсора характеризуется величиной СКО полного шума и считается следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma(S) &= \sqrt{\sigma_{lt}^2 + \sigma_{dt}^2 + \sigma_{ls}^2 + \sigma_{ds}^2} = \\ &= \sqrt{\frac{S}{K} + \sigma_{dt}^2 + (S * PRNU)^2 + DSNU^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma(S)$ – полный, σ_{lt} – световой временной, σ_{dt} – темновой временной, σ_{ls} – световой пространственный и σ_{ds} – темновой пространственный шумов, S – уровень сигнала, $PRNU$ – неоднородность фоточувствительности пикселей, $DSNU$ – неоднородность темнового сигнала, K – константа пересчёта числа генерируемых электронов в цифровые единицы.

В данную модель также можно отдельно добавить ещё одну составляющую шума, являющуюся его нижним порогом – шум квантования, возникающий вследствие аналого-цифрового преобразования (АЦП). Значение СКО шума квантования рассчитывается следующим образом [10]:

$$\sigma_{quant} = \frac{1}{\sqrt{12}} DN \approx 0,29 DN, \quad (2)$$

где DN – digital numbers (цифровые единицы сигнала). Данное значение обычно на один или на несколько порядков меньше, чем указанные выше другие шумовые составляющие: временные и пространственные шумы.

2. Анализ методов нахождения шумовых характеристик фотосенсоров камер

2.1. Стандарт EMVA 1288

Стандартный метод характеристики цифровой камеры (например, по стандарту EMVA 1288 [10]) подразумевает регистрацию как минимум пятидесяти серий снимков на разных уровнях сигнала. Каждой серии кадров будет соответствовать одна точка зависимости временного шума от уровня сигнала. Минимальное количество снимков в серии соответствует двум, но для увеличения точности результатов можно использовать большее число снимков в серии. Характеристика шумов камеры с использованием данного метода включает следующие этапы:

- 1) Регистрация серии темновых кадров (при закрытой крышке и минимальном времени экспозиции).
- 2) Регистрация пятидесяти серий по два снимка с равномерной яркостью (при удовлетворении минимальных требований) на различных уровнях сигнала (например, изменяя яркость источника излучения).
- 3) Расчёт значений СКО светового σ_{lt}^E , темнового σ_{dt}^E и суммарного σ_t^E временных шумов для каждой серии по формулам:

$$\sigma_{dt}^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (D_1[m,n] - D_2[m,n])^2}{2MN}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{dt}^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (L_1[m,n] - L_2[m,n])^2}{2MN} - (\sigma_{dt}^E)^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_t^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (L_1[m,n] - L_2[m,n])^2}{2MN}}, \quad (5)$$

где $D_1[m, n]$ и $D_2[m, n]$ – значения сигналов в матрицах двух темновых снимков, $L_1[m, n]$ и $L_2[m, n]$ – значения сигналов в матрицах двух световых снимков с одинаковой яркостью, M и N – горизонтальный и вертикальный размеры матрицы сигналов, m, n – счётчики.

4) Построение зависимости временного шума от уровня сигнала и определение по нему константы пересчёта числа генерируемых электронов в цифровые единицы K .

5) Определение пространственных шумов, используя серию световых снимков, соответствующую середине шкалы уровней сигнала, и серию темновых кадров:

$$DSNU^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (\overline{D[m,n]} - \overline{D})^2}{(MN-1)} - (\sigma_{dt}^E)^2}, \quad (6)$$

$$PRNU^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (\overline{L[m,n]} - \overline{L})^2}{(MN-1)} - (\sigma_t^E)^2}, \quad (7)$$

где

$$\overline{D[m,n]} = \frac{D_1[m,n] + D_2[m,n]}{2}, \quad (8)$$

$$\overline{L[m,n]} = \frac{L_1[m,n] + L_2[m,n]}{2}, \quad (9)$$

$$\overline{D} = \frac{\sum_{m,n} \overline{D[m,n]}}{MN}, \quad \overline{L} = \frac{\sum_{m,n} \overline{L[m,n]}}{MN}. \quad (10)$$

Основным преимуществом стандарта перед остальными методами является его точность. Причём точность может быть повышена как за счёт упомянутого увеличения количества снимков в серии, так и за счёт увеличения числа градаций, на которых проводится съёмка. Однако для реализации метода требуются как значительные временные затраты, так и ресурсы для хранения информации.

2.2. Автоматическая сегментация неоднородной сцены (АСНС)

Методы на основе автоматической сегментации неоднородной сцены (automatic segmentation of non-uniform target, ASNT) позволили существенно снизить временные затраты в сравнении со стандартом

EMVA 1288 [18]. В качестве сцены можно использовать, например, равномерно освещённый транспарант с градиентным пропусканием [16]. Транспарант представляет из себя пластинку с плавно меняющимся пропусканием от условно нулевого до максимального. Важно, чтобы динамический диапазон такого транспаранта превышал динамический диапазон сенсора [17]. Схему метода можно представить в следующем виде:

- 1) Съёмка двух кадров выше описанной сцены.
- 2) Создание матрицы усреднённых сигналов (усреднённый кадр):

$$\overline{G[m,n]} = \frac{G_1[m,n] + G_2[m,n]}{2}, \quad (11)$$

где $G_1[m, n]$ и $G_2[m, n]$ – значения сигналов в матрицах двух снимков неоднородной сцены.

- 3) Расчёт матрицы дисперсий сигнала на основе несмещённой оценки:

$$\sigma_t^{2ASNT}[m,n] = \frac{(G_1[m,n] - G_2[m,n])^2}{2}. \quad (12)$$

В результате на данном этапе получаются значения СКО временных шумов.

- 4) Отбор сигналов из усреднённого кадра $\overline{G[m,n]}$, соответствующих диапазону $S \in [S-\Delta, S+\Delta]$, где Δ определяет шаг при построении зависимости временного шума от уровня сигнала, и выбор соответствующих им пикселей из матрицы дисперсий. Значение СКО временного шума для сигнала S будет определяться средней дисперсией по группе данных пикселей:

$$\sigma_t^{ASNT}(S) = \sqrt{\frac{\sum_{mS,nS} \sigma_t^{2ASNT}[mS,nS]}{M_S}}, \quad (13)$$

где mS, nS – индексы пикселей массива $\overline{G[m,n]}$ (усреднённого кадра), имеющие уровень сигнала $S \in [S-\Delta, S+\Delta]$, M_S – количество таких пикселей.

- 5) Построение графика зависимости временных шумов от уровня сигнала для всех диапазонов S .

Полученная информация позволяет найти значение СКО темнового σ_{dt}^{ASNT} и светового временного шума, а также соответствующую им константу пересчёта электронов в цифровые единицы K путём решения системы уравнений типа:

$$\sigma_t^{ASNT}(S) = \sqrt{(\sigma_{dt}^{ASNT})^2 + \frac{S}{K}}. \quad (14)$$

Метод АСНС позволяет осуществлять достаточно точное [17] измерение временных шумов, однако не обеспечивает корректное определение $PRNU$ и $DSNU$. Технически можно было бы найти СКО полного шума σ как дисперсию по выражению, соответствующему несмещённой оценке, где вместо усреднённых сигналов будут стоять их реальные значения, и ре-

шить систему уравнений типа (1) относительно коэффициентов $PRNU$ и $DSNU$. Однако на практике сильно возрастёт ошибка оценок из-за малой доли сенсора, занимаемой пикселями с приблизительно одним и тем же уровнем сигнала, а также из-за неизвестности положения данных областей.

2.3. Оценка шумов из одного кадра

Помимо методов, позволяющих измерить шумовые характеристики по нескольким кадрам [10, 16–18], существуют методы оценки шумов при помощи одного изображения [13–15]. Например, в [15] применяется пуассоново-гауссова модель шума, где пуассоново распределение соответствует фотонному дробовому шуму, а гауссово – остальным составляющим. Модель образования сигнала имеет вид:

$$z(x) = y(x) + \sigma(y(x))\xi(x), \quad (15)$$

где $z(x)$ – сигнал в пикселе снимка, $y(x)$ – сигнал без шумов (неизвестный), $\sigma(y(x))$ – стандартное отклонение всех компонент шума, $\xi(x)$ – независимый случайный шум с единичным стандартным отклонением и нулевым средним. В рамках пуассоново-гауссовой модели $\sigma(y(x))\xi(x)$ представимо в виде:

$$\sigma(y(x))\xi(x) = \eta_p(y(x)) + \eta_g(y(x)), \quad (16)$$

где $\eta_p(y(x))$ – пуассонова составляющая, $\eta_g(y(x))$ – гауссова составляющая шума. Пуассонова составляющая может быть аппроксимирована нормальным распределением при больших значениях математического ожидания [21], что и используется для упрощения выражений. Метод направлен на оценку общего стандартного отклонения всех составляющих шума и включает следующие шаги:

- 1) Получение двух матриц с вейвлет-коэффициентами [22]: матрицы вейвлет-элементов (путём свёртки исходной матрицы с нормированной 2D-функцией с нулевым средним) и аппроксимационной вейвлет-матрицы, полученной путём свёртки исходной матрицы и масштабирующей (scaling) 2D-функции с единичным средним. Кроме того, на данном этапе удаляется каждая вторая строка и каждый второй столбец.
- 2) Разбиение матриц вейвлет-коэффициентов по группам относительно сигналов в пикселях. Для улучшения качества сегментации требуется убрать границы из доменов. Для этого применяется метод сглаженной аппроксимации: свёрткой исходной аппроксимационной матрицы вейвлет-коэффициентов с низкочастотным фильтром находится сглаженная матрица, после чего границы детектируются при помощи дифференциального анализа стандартных отклонений. После удаления границ проводится отбор коэффициентов из сглаженной аппроксимационной матрицы с опре-

делённым шагом, таким образом получаются группы коэффициентов, не содержащие границы и находящиеся в пределах одного шага отбора.

- 3) Расчёт средних величин и значений стандартного отклонения для каждого набора коэффициентов, сформированного на шаге (2).

Конечным результатом применения метода является лишь график зависимости стандартного отклонения от среднего значения сигналов по группам пикселей и нахождение наиболее вероятной кривой.

Основным преимуществом метода является быстрота его реализации. Недостатком же является то, что после получения зависимости стандартного отклонения от среднего значения сигналов невозможно оценить пространственную и временную составляющие шума по отдельности.

3. Разработанный метод на основе автоматической сегментации полосовой сцены (АСПС) и его экспериментальная апробация

3.1. Описание метода АСПС

Метод АСПС предполагает регистрацию сцены с почти непрерывно меняющимся профилем пропускания, что обеспечивает быструю и точную оценку временного шума [17]. Однако отсутствие равномерных участков не позволяет измерить пространственный шум. Для решения данной проблемы предлагается метод АСПС (automatic segmentation of stripe target, ASST). При этом регистрируемая сцена должна иметь квазидискретный профиль пропускания. Это обеспечит как нахождение зависимости временного шума от сигнала, так как в сцене присутствует много градаций, так и пространственного шума, так как в сцене есть значительные по площади квазидискретные участки яркости. Примером подобной сцены с квазидискретным профилем пропускания может служить транспарант с полосами различной яркости. При этом в сцене обязательно должна присутствовать часть (полоса), соответствующая минимальному пропусканию, что обеспечит оценку темновых составляющих шума. Схема метода представлена на рис. 1.

Алгоритм нахождения шумов фотосенсора камеры методом АСПС можно представить следующим образом:

- 1) Регистрация двух (или большего числа) снимков сцены, включающей равномерно освещённый полосовой транспарант.
- 2) Создание двух массивов: усреднённый снимок и массив с дисперсиями (квадратами СКО) сигналов между снимками:

$$\overline{P[m,n]} = \frac{P_1[m,n] + P_2[m,n]}{2}, \quad (17)$$

$$\sigma_i^{ASST}[m,n] = \frac{(P_1[m,n] - P_2[m,n])^2}{2}, \quad (18)$$

где $P_1[m, n]$ и $P_2[m, n]$ – значения сигналов в матрицах двух снимков полосовой сцены.

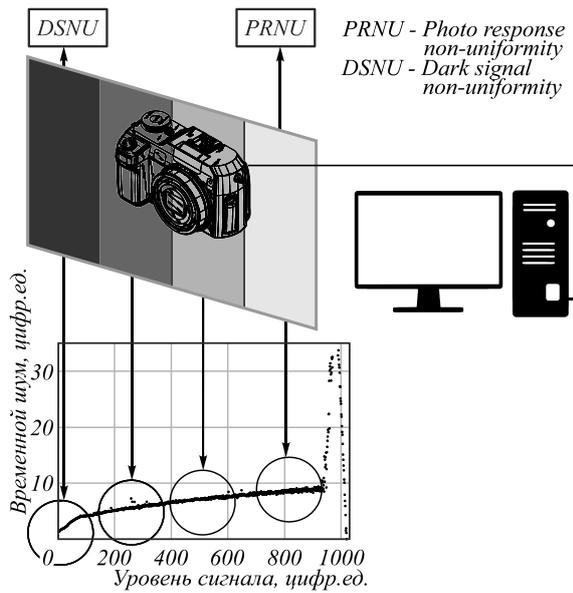


Рис. 1. Схема метода на основе автоматической сегментации полосовой сцены

3) Анализ участка (полосы), соответствующего темновому сигналу:

3.1) Нахождение СКО темного временного шума как квадратного корня из средней временной дисперсии сигнала (т.е. из массива с дисперсиями – квадратами СКО), что схоже с выражением (3):

$$\sigma_{dt}^{ASST} = \sqrt{\frac{\sum_{md,nd} \sigma_t^{2ASST} [md, nd]}{M_d N_d}}, \quad (19)$$

где M_d и N_d – горизонтальный и вертикальный размеры матрицы сигналов в пределах данного участка (полосы), md, nd – счётчики.

3.2) Нахождение неоднородности темного сигнала (DSNU) как квадратного корня из разности квадратов средней дисперсии по темновой части снимка и СКО темного временного шума, что схоже с выражением (6):

$$DSNU^{ASST} = \sqrt{\frac{\sum_{md,nd} (\overline{P[md, nd]} - \overline{P_d})^2}{(M_d N_d - 1)} - (\sigma_{dt}^{ASST})^2}, \quad (20)$$

где

$$\overline{P_d} = \frac{\sum_{md,nd} \overline{P[md, nd]}}{M_d N_d}. \quad (21)$$

4) Анализ участков (полос), соответствующих остальным сигналам:

4.1) Отбор сигналов из усреднённого кадра (массива $\overline{P[m, n]}$), соответствующих диапазону $S \in [S - \Delta, S + \Delta]$, где Δ определяет шаг при по-

строении зависимости временного шума от уровня сигнала, и выбор соответствующих им пикселей из массива дисперсий (квадратов СКО). Значение СКО временного шума для сигнала S будет определяться средней дисперсией по группе данных пикселей:

$$\sigma_t^{ASST}(S) = \sqrt{\frac{\sum_{mS, nS} \sigma_t^{2ASST} [mS, nS]}{M_S}}, \quad (22)$$

где mS, nS – индексы пикселей массива $\overline{P[m, n]}$ (усредненного кадра), имеющие уровень сигнала $S \in [S - \Delta, S + \Delta]$, M_S – количество таких пикселей.

4.2) Построение графика зависимости временных шумов от уровня сигнала и нахождение константы пересчёта числа электронов в цифровые единицы K , что схоже с выражением (14):

$$\sigma_t^{ASST}(S) = \sqrt{(\sigma_{dt}^{ASST})^2 + \frac{S}{K}}. \quad (23)$$

4.3) Нахождение неоднородности фоточувствительности пикселей (PRNU) как среднего показателя для каждого участка (полосы), что схоже с выражением (7):

$$PRNU^{ASST} = \frac{\sum_p PRNU^{ASST} [p]}{T}, \quad (24)$$

где

$$PRNU^{ASST} [p] = \sqrt{\frac{\sum_{mp, np} (\overline{P[mp, np]} - \overline{P_p})^2}{(M_p - 1)} - (\sigma_t^{ASST})^2}, \quad (25)$$

$$\overline{P_p} = \frac{\sum_{mp, np} \overline{P[mp, np]}}{M_p}, \quad (26)$$

T – число световых участков (полос), mp, np – индексы пикселей массива $\overline{P[m, n]}$ (усредненного кадра) в рамках p -й полосы, M_p – количество пикселей в рамках p -й полосы.

В результате предложенный метод АСПС использует преимущества как стандарта EMVA 1288, так и метода АСНС: регистрация всего лишь 2 кадров одной сцены, быстрота реализации, нахождение как временных, так и пространственных шумов.

3.2. Условия экспериментов по измерению шумов фотосенсоров камер

Для экспериментальной апробации разработанного метода АСПС создана установка, схема которой представлена на рис. 2. В качестве источника излуче-

ния использовался He-Ne лазер с длиной волны 632,8 нм и мощностью излучения 10 мВт. Для фильтрации пучка использовалась система, включающая линзу и диафрагму. Для снижения пространственной когерентности излучения и для создания однородного освещения использовался вращающийся матовый рассеиватель. В качестве тестового изображения использовался транспарант, состоящий из нескольких полос с одинаковой освещённостью, но различным пропусканием. Для повышения точности оценки временных шумов желательно увеличить равномерность гистограммы яркости снимков. Поэтому производилась регистрация расфокусированных изображений сцены. Управление цифровой камерой осуществлялось с компьютера.

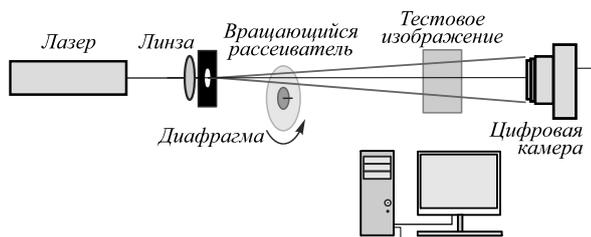


Рис. 2. Схема экспериментальной установки, используемой для измерения шумов камер методом АСПС

Измерения проводились для камер разного типа с различным строением фотосенсора: камеры технического зрения PixeLink PL-B781F и камеры для научных измерений Retiga R6. Технические характеристики камер представлены в табл. 1. Изображения регистрировались без усиления и гамма-коррекции.

Табл. 1. Технические характеристики исследуемых цифровых камер

	Камера PixeLink PL-B781F	Камера Retiga R6
Разрядность АЦП, бит	10	14
Количество пикселей, млн	6,62	5,91
Минимальная экспозиция, мс	0,063	0,0006
Размер пикселя, мкм	3,5 × 3,5	4,6 × 4,6
Тип сенсора	КМОП	ПЗС
Цветность	Монохромная	Монохромная
Назначение	Машинное зрение	Научные задачи

3.3. Результаты экспериментов и их сравнение с оценками, полученными другими методами

Пример снимка полосовой сцены, используемой в методе АСНС, и полученные графики зависимости временного шума от уровня сигнала представлены на рис. 3 (а, в, д), где цифр.ед. – цифровые единицы сигнала. Для сравнения на рис. 3 (б, г, е) показан снимок, использованный для метода АСПС, и соответствующие графики зависимостей. Для обоих методов зависимости получены из 2 кадров. Как видно, не только метод АСНС позволил получить зависимость временного

шума с большим количеством точек, но и метод АСПС. При этом отличие положения точек между методами составило не более 7%, а аппроксимированных по корневому закону кривых – не более 1%, что является показателем состоятельности предложенного метода.

Полученные методами АСНС и АСПС значения темнового временного шума и константы пересчёта числа электронов в цифровые единицы (эл./цифр.ед.), исходя из зависимости временного шума от сигнала, представлены в табл. 2. Так как метод АСНС не обеспечивает измерение пространственных шумов, то для сравнения измеренных значений PRNU и DSNU методом АСПС приведены характеристики, полученные стандартом EMVA 1288. Производители камер предоставили три шумовых параметра, которые также добавлены в таблицу.

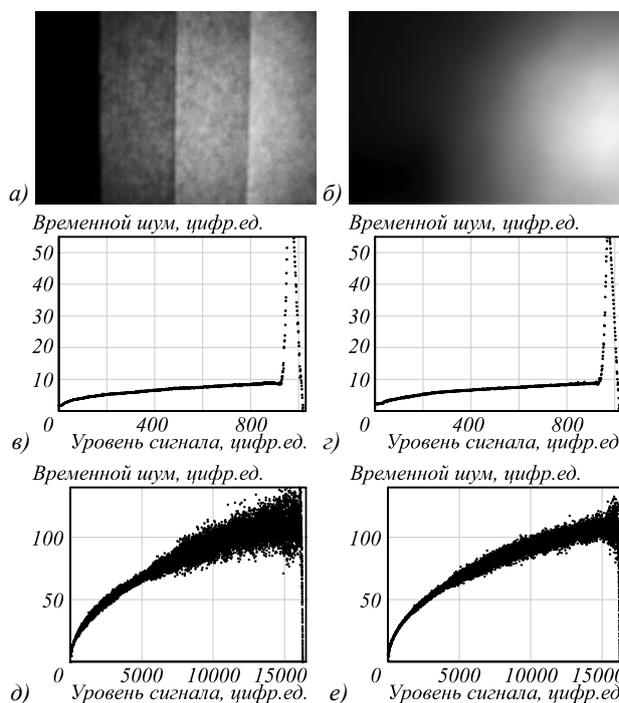


Рис. 3. Примеры снимков тестовых сцен (а, б) и графики зависимостей временного шума от уровня сигнала для камер PixeLink PL-B781F (в, г) и Retiga R6 (д, е), полученных с помощью методов АСПС и АСНС соответственно

Табл. 2. Шумовые характеристики исследуемых камер: измеренные методами АСНС, АСПС и стандартом EMVA 1288, а также данные производителя

	PRNU, %	DSNU, цифр.ед.	К, эл./цифр.ед.	σ_{dt} , цифр.ед.
PixeLink PL-B781F				
Паспорт	–	–	–	≤ 1
EMVA	$0,750 \pm 0,003$	$0,66 \pm 0,02$	$10,7 \pm 0,6$	$0,35 \pm 0,01$
АСНС	–	–	$10,7 \pm 0,8$	$0,87 \pm 0,05$
АСПС	$0,74 \pm 0,02$	$1,7 \pm 1,1$	$10,8 \pm 0,5$	$0,5 \pm 0,2$
Retiga R6				
Паспорт	–	–	$\geq 1,22$	$\leq 4,5$
EMVA	$0,336 \pm 0,004$	$0,5 \pm 0,1$	$1,19 \pm 0,04$	$4,46 \pm 0,01$
АСНС	–	–	$1,2 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,7$
АСПС	$0,338 \pm 0,004$	$0,4 \pm 0,1$	$1,20 \pm 0,07$	$4,44 \pm 0,02$

Из табл. 2 видно, что характеристики, полученные при использовании метода АСПС, сравнимы по точности с найденными методом АСНС. Они также в пределах погрешности совпадают с данными производителя и измеренными по стандарту EMVA 1288. Это демонстрирует как корректность полученных значений предлагаемым методом АСПС, так и весьма высокий уровень точности результатов, сравнимый с другими методами, в том числе времязатратным стандартом. Погрешность измерения методом АСПС только одного параметра ($DSNU$) одной камеры (PixeLink PL-B781F) существенно отличается от стандарта. Так как на полосовом транспаранте практически отсутствуют неосвещённые области (которые соответствуют сигналам темного кадра, т.е. при съемке с закрытой крышкой), то это приводит к уменьшению точности определения $DSNU$. Однако даже полученное значение совпадает со стандартом в пределах погрешности. В конкретном случае камеры PixeLink PL-B781F на точность оценки $DSNU$ также оказывают влияние особенности регистрации при малых уровнях сигнала.

Для оценки скоростных характеристик предложенного метода АСПС проведено сравнение времени обработки кадров с другим оперативным методом – методом АСНС. Полученные результаты для обеих исследуемых камер показаны в табл. 3. Оценки временных затрат проводились в среде MATLAB на устройстве LENOVO (Процессор: Intel(R) Core(TM), I7-4510UCPU 2.00GHz 2.6 GHz, ОЗУ: 6 Гб).

Табл. 3. Время нахождения шумовых характеристик камер PixeLink PL-B781F и Retiga R6 методами АСНС и АСПС

	Камера PixeLink PL-B781F	Камера Retiga R6
Метод АСНС	427 с	57 с
Метод АСПС	392 с	62 с

Как видно, отличие времён расчёта двумя методами для каждой камеры составило не больше 10%, однако при этом метод АСПС позволил оценить все четыре основные шумовые составляющие, в то время как метод АСНС – лишь две. В результате для камеры PixeLink PL-B781F расчёт методом АСПС был на 5 секунд дольше. В случае камеры Retiga R6 расчёт методом АСПС осуществился быстрее, чем методом АСНС, это связано с тем, что полосовая сцена содержит больше равномерных областей, чем неравномерных. Этот факт, а также отсутствие некоторых градаций в снимке полосовой сцены позволяет ускорить расчёт зависимости временного шума от сигнала методом АСПС. Для камеры PixeLink PL-B781F ускорения не было, так как разрядность её АЦП существенно меньше, чем в случае камеры Retiga R6.

Таким образом, метод АСПС может обеспечивать даже более быстрый расчёт шумов, чем метод АСНС, особенно при больших значениях разрядности АЦП камеры. При этом несмотря на то, что методы имеют

различные времена расчёта, основной вклад в общее время реализации вносит сборка и юстировка экспериментальной установки, а также время регистрации необходимого количества снимков.

3.4. Использование различных сцен в методе АСПС

При измерении шумов методом АСПС тестовая сцена в установке имела четыре полосовых участка (см. рис. 3а). Однако можно использовать как другое число полос, так и другую геометрию квазиравномерных областей. Для примера на рис. 4а, б представлены снимки двух сцен: содержащей 2 полосовых участка и состоящей из 4 участков, отделённых окружностями. Сцена с окружностями может обеспечить большую равномерность при использовании источника излучения с круговой симметрией, чем полосовая. Полученные графики зависимостей временного шума от сигнала для камеры PixeLink PL-B781F при использовании данных сцен приведены на рис. 4в, г, а для 4-полосовой сцены – на рис. 3в. Видно, что графики, соответствующие каждой сцене, имеют не очень значительные отличия. Однако при использовании камеры с большим числом градаций 2-полосовая сцена уже может не обеспечить наличие большинства точек зависимости временного шума от уровня сигнала и/или высокую точность полученных точек. Это связано с тем, что график будет уже не непрерывной кривой, а двумя отдельными участками. Поэтому для получения оценки временного шума следует использовать сцену с количеством квазиравномерных областей больше 2.

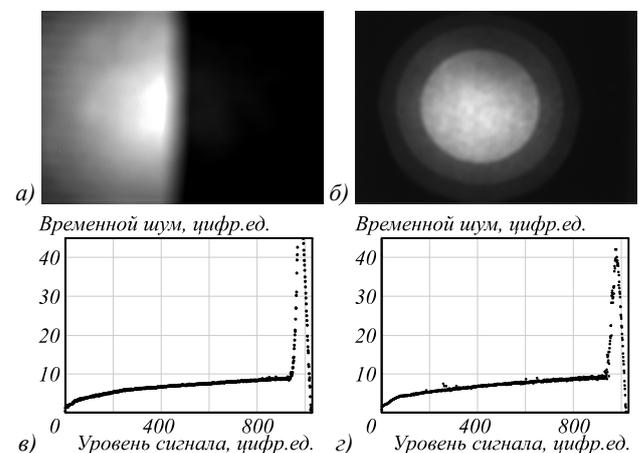


Рис. 4. Примеры снимков тестовых сцен (а, б) и графики зависимостей временного шума от уровня сигнала для камеры PixeLink PL-B781F (в, г), полученных при использовании сцен: 2-полосовой (а, в) и состоящей из 4 участков, отделённых окружностями (б, г)

Выбор типа сцены (с окружностями или полосовой) определяется используемым источником излучения и степенью равномерности освещения плоскости сцены. Если используется источник излучения с круговой диаграммой направленности (например, гауссов лазерный пучок), то круговая сцена обеспе-

чит большую равномерность в рамках каждого участка, что, в свою очередь, должно приводить к повышению точности оценок световых пространственных шумов. В то же время в случае источника излучения с не круговой диаграммой направленности или при использовании набора источников излучения следует ориентироваться на сцену с полосовыми участками, длина и ширина которых отличается не более чем в разы (т.е. на сцену с прямоугольными полосами, см. рис. 3а). Из результатов проведённого эксперимента видно, что при данной конкретной конфигурации установки вклад диаграммы направленности источника в неоднородность сцены не оказывает существенного влияния на точность определения световых пространственных шумов (т.к. результаты измерений методом АСПС и погрешности полученных величин соответствуют стандарту). Однако при другой конфигурации установки (например, уменьшении расстояний между элементами конструкции) неоднородность освещённости может давать существенный вклад в величину световых пространственных шумов и более предпочтительным будет использование круговой сцены для снижения влияния неоднородности.

Как видно из рис. 3–4, регистрируемая сцена имеет квазиравномерные области и поэтому граничные участки между ними будут представлять собой градиенты яркости на кадрах. Из-за дефокусировки при съёмке эти области могут занимать значительную часть всего кадра. Увеличение доли градиентных участков позволяет повысить точность оценки временных шумов, однако при этом снижается площадь квазиравномерных областей, позволяющих измерить пространственные шумы. Для оценок связи числа полос в сцене и размера градиентных областей на примере камеры PixeLink PL-B781F была проведена съёмка кадров с различным количеством квазиравномерных участков. В табл. 4 приведены результаты для случаев сцен, состоящих из 2, 4, 8 и 16 полос. Как видно, при использовании 16-полосовой сцены доля площади квазиравномерных участков составляет только 60,4%, что уже практически нарушает требования характеристики пространственного шума как минимум большей части сенсора. При этом доля площади темновой полосы, которая позволяет оценить темновой пространственный шум, составляет менее 9% для 8-полосовой сцены и менее 4% для 16-полосовой, что может уже существенно снижать точность данной оценки.

Таким образом, в общем случае предпочтительно использование сцены, состоящей из 3 ÷ 5 полосовых квазиравномерных участков.

3.5. Использование различного числа кадров в методе АСПС

В предложенном методе АСПС минимальное число регистрируемых кадров равно 2. В случае, если точности полученных значений шумовых составля-

ющих оказывается недостаточно, можно производить регистрацию большего числа кадров. На рис. 5 приведены графики зависимости временного шума от уровня сигнала для камеры Retiga R6 при использовании 2, 4 и 16 кадров сцены.

Табл. 4. Доля площади квазиравномерных и градиентных областей в снимках сцен с различным числом полосовых участков

	2 полосы в сцене	4 полосы в сцене	8 полос в сцене	16 полос в сцене
Доля площади одной полосы, %	45,0	18,8	8,8	3,8
Доля площади всех полос, %	89,9	75,1	70	60,4
Доля площади градиентных областей, %	10,1	24,9	30	39,6

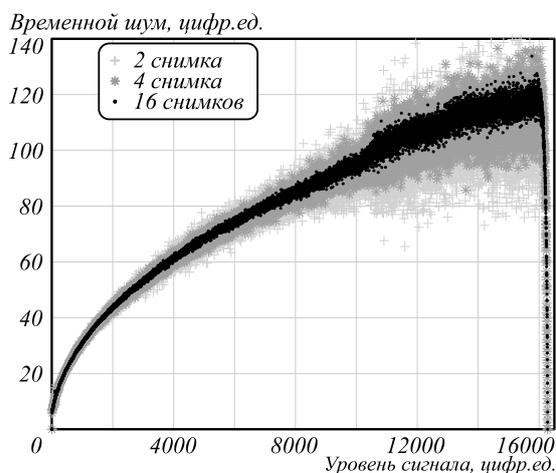


Рис. 5. Графики зависимостей временного шума от уровня сигнала для камеры Retiga R6, полученных при съёмке 2, 4 и 16 кадров

Как видно, увеличение числа снимков приводит к снижению разброса точек. Это обеспечивает повышение точности оценки в первую очередь константы пересчёта электронов в цифровые единицы K , а также темнового временного шума. Точность определения пространственных шумов также увеличивается вследствие повышения статистической точности определения разбросов величин, входящих в выражения для их расчётов (см. выражения (20), (24)). Точность оценки шумов пропорциональна квадратному корню из числа кадров F за вычетом единицы ($\sim \sqrt{F-1}$), как и в методе АСНС, так как использует схожую систему сегментации [17]. В результате в сравнении со случаем 2 кадров использование, например, 4 кадров снижает погрешность измерений в 1,7 раза, а 16 кадров – в 3,9 раза.

Для многих камер увеличение количества кадров не очень значительно повысит время реализации метода АСПС: время съёмки увеличится лишь на количество требуемых дополнительных экспозиций, что несущественно при использовании режима серийной регистрации; обработка увеличится на время создания усредненного кадра и массива с дисперсиями, что

для стандартной камеры обычно составляет менее 10% общего времени. При этом можно достичь более высокой точности оценки шумов фотосенсоров.

Заключение

В работе предложен метод оперативной характеристики сенсоров фото- и видеокамер, позволяющий измерить все основные шумовые параметры: световые и темновые пространственные и временные шумы. Метод включает регистрацию всего 2 снимков одной полосовой сцены и их цифровую обработку.

Метод был экспериментально апробирован на камерах различных типов. Время нахождения шумов не уступает другим методам оперативного измерения: например, методу с автоматической сегментацией неоднородной сцены, однако позволяющему оценить лишь временные шумы. Точность оценок всех шумов по 2 кадрам не уступает другим оперативным методам, а в оценке основных шумов – светового типа – стандартам, например, EMVA 1288. При этом использование большего числа кадров позволяет дополнительно повысить точность оценки шумов разработанным методом.

Данный метод может быть использован для характеристики фото- и видеокамер как с целью уменьшения влияния шумов на регистрируемые изображения, дальнейшего шумоподавления или цифровой обработки, так и для оценки возможностей камер и достижимых отношений сигнал/шум в конкретных научных и любительских задачах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Литература

1. **Cotton, C.** The photograph as contemporary art / C. Cotton. – New York: Thames & Hudson, 2015. – 256 p.
2. **Thaker, A.D.** Morphological analysis and mapping of complex craters of 2 Copernican age: Crookes, Ohm and Stevinus / A.D. Thaker, S.M. Patel, P.M. Solanki // Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 184. – 104856. – DOI: 10.1016/j.pss.2020.104856.
3. **Cerrato-Alvarez, M.** Measurement of tropospheric ozone by digital image analysis of indigotrisulfonate-impregnated passive sampling pads using a smartphone camera / M. Cerrato-Alvarez, S. Frutos-Puerto, C. Miró-Rodríguez, E. Pinilla-Gil // Microchemical Journal. – 2020. – Vol. 154. – 104535. – DOI: 10.1016/j.microc.2019.104535.
4. **Cai, F.** High-resolution mobile bio-microscope with smartphone telephoto camera lens / F. Cai, T. Wang, W. Lu, X. Zhang // Optik. – 2020. – Vol. 207. – 164449. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164449.
5. **Mai, H.H.** Testing edible oil authenticity by using smartphone based spectrometer / H.H. Mai, T.Th. Le // Computer Optics. – 2020. – Vol. 44(2). – P. 189-194. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-604.
6. **Евтихий, Н.Н.** Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света / Н.Н. Евтихий, Е.Ю. Злоказов, В.В. Краснов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черёмхин // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50, № 7. – С. 667-674.
7. **Гризбил, Б.А.** Дифракционная модель лазерного спеклинтерферометра микросмещений объектов с рассеивающей поверхностью / Б.А. Гризбил, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 568-577. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-702.
8. **Гончаров, Д.С.** Влияние дополнительной фазовой модуляции амплитудных жидкокристаллических ПВМС на характеристики распознавания изображений в инвариантном оптико-цифровом корреляторе / Д.С. Гончаров, Н.Н. Евтихий, В.В. Краснов, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 200-208. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208.
9. **Евтихий, Н.Н.** Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света / Н.Н. Евтихий, В.В. Краснов, И.Д. Кузьмин, Д.Ю. Молодцов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черёмхин // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50, № 2. – С. 195-196.
10. European Machine Vision Association, EMVA Standard 1288. Standard for characterization of image sensors and cameras 3.1 2016. [Electronical Resource] – URL: <http://www.emva.org/cms/upload/Standards/> (request date 13.07.2020).
11. **Rakhshanfar, M.** Estimation of Gaussian, Poissonian-Gaussian, and processed visual noise and its level function / M. Rakhshanfar, M.A. Amer // IEEE Transactions on Image Processing. – 2016. – Vol. 25, Issue 9. – P. 4172-4185. – DOI: 10.1109/TIP.2016.2588320.
12. **Maggioni, M.** Nonlocal transform-domain filter for volumetric data denoising and reconstruction / M. Maggioni, V. Katkovnik, K. Egiazarian, A. Foi // IEEE Transactions on Image Processing. – 2013. – Vol. 22, Issue 1. – P. 119-133. – DOI: 10.1109/TIP.2012.2210725.
13. **Liu, C.** Automatic estimation and removal of noise from a single image / C. Liu, R. Szeliski, S.B. Kang, C.L. Zitnick, W.T. Freeman // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – Vol. 30, Issue 2. – P. 299-314. – DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1176.
14. **Yesilyurt, A.B.** Single image noise level estimation using dark channel prior / A.B. Yesilyurt, A. Erol, F. Kamisli, A.A. Alatan // Proceedings of International Conference on Image Processing. – 2019. – P. 2065-2069. – DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803150.
15. **Foi, A.** Practical Poissonian-Gaussian noise modeling and fitting for single-image raw-data / A. Foi, M. Trimeche, V. Katkovnik, K. Egiazarian // IEEE Transactions on Image Processing. – 2008. – Vol. 17, Issue 10. – P. 1737-1754. – DOI: 10.1109/TIP.2008.2001399.
16. **Foi, A.** Noise measurement for raw-data of digital imaging sensors by automatic segmentation of nonuniform targets / A. Foi, S. Alenius, V. Katkovnik, K. Egiazarian // IEEE Sensors Journal. – 2007. – Vol. 7, Issue 10. – P. 1456-1461. – DOI: 10.1109/JSEN.2007.904864.
17. **Cheremkhin, P.A.** Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of nonuniform target, its accuracy estimation, and application to cameras of different types / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, V.V. Krasnov, V.G. Rodin // Optical Engineering. – 2014. – Vol. 53, Issue 10. – 102107. – DOI: 10.1117/1.OE.53.10.102107.

18. **Cheremkhin, P.A.** Fast measurement of temporal noise of digital camera's photosensors / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, R.S. Starikov, S.N. Starikov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9648. – 96480R. – DOI: 10.1117/12.2194979.
19. **Nakamura, J.** Image sensors and signal processing for digital still cameras / J. Nakamura. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 350 p.
20. **Maître, H.** From photon to pixel: The digital camera handbook / H. Maître. – Hoboken: Wiley, 2017. – 464 p.
21. **Bertalmío, M.** Denoising of photographic images and video. Fundamentals, open challenges and new trends / M. Bertalmío. – Cham, Switzerland: Springer, 2018. – 333 p.
22. **Donoho, D.L.** Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage / D.L. Donoho, I.M. Johnstone // Biometrika. – 1994. – Vol. 81, Issue 3. – P. 425-455. – DOI: 10.1093/biomet/81.3.425.

Сведения об авторах

Евтихий Николай Николаевич, д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: обработка сигналов и изображений, оптическая обработка информации, оптика, лазерная физика, распознавание образов. E-mail: k1121@mail.ru.

Козлов Александр Валерьевич, магистрант, кафедра лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: цифровая обработка изображений, шумы цифровых камер, цифровая голография. E-mail: AlexKozloVV@yandex.ru.

Краснов Виталий Вячеславович, к.ф.-м.н., доцент, Отделение лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: оптическое кодирование, синтез дифракционных оптических элементов, восстановление волнового фронта, обработки сигналов, шумы камеры. E-mail: vitaly.krasnov@mail.ru.

Родин Владислав Геннадьевич, к.ф.-м.н., с.н.с., кафедра лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: оптическая обработка изображений, синтез дифракционных оптических элементов, голография. E-mail: holo_mephi@mail.ru.

Стариков Ростислав Сергеевич, д.ф.-м.н., профессор, Отделение лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), область научных интересов: оптическая обработка изображений и сигналов, оптико-цифровые системы, модуляция света, голография. E-mail: rstarikov@mail.ru.

Черёмхин Павел Аркадьевич, к.ф.-м.н., доцент, Отделение лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: цифровая голография, шумы камер, дифракционная оптика, восстановление волнового фронта, обработка сигналов и изображений. E-mail: cheremhinpavel@mail.ru.

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 25 сентября 2020 г. Окончательный вариант – 16 декабря 2020 г.

A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target

N.N. Evtikhiev¹, A.V. Kozlov¹, V.V. Krasnov¹, V.G. Rodin¹, R.S. Starikov¹, P.A. Cheremkhin¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
115409, Moscow, Russia, Kashirskoye Shosse 31

Abstract

Currently, cameras are widely used in scientific, industrial and amateur tasks. Thus, one needs to be able to quickly evaluate characteristics and capabilities of a particular camera. A method for measuring noise components of the camera photosensor is proposed. It allows one to estimate shot noise, dark temporal noise, photo response non-uniformity and dark signal non-uniformity. For noise measurement, just two images of the same scene need to be registered. The scene consists of several stripes (quasihomogeneous regions). Then the images are processed by automatic signal segmentation. The performance and accuracy of the proposed method are higher than or equal to other fast methods. The experimental results obtained are similar to those derived using a time-consuming standard method within a measurement error.

Keywords: digital cameras; sensors; digital image processing; image segmentation; shot noise; photo response non-uniformity.

Citation: Evtikhiev NN, Kozlov AV, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target. *Computer Optics* 2021; 45(2): 267-276. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-815.

Acknowledgements: This work was supported by the MEPhI's Competitiveness Growth Program.

References

- [1] Cotton C. The photograph as contemporary art. 3rd ed. New York: Thames & Hudson; 2015.
 - [2] Thaker AD, Patel SM, Solanki PM. Morphological analysis and mapping of complex craters of 2 Copernican age: Crookes, Ohm and Stevinus. *Planet Space Sci* 2020; 184: 104856. DOI: 10.1016/j.pss.2020.104856.
 - [3] Cerrato-Alvarez M, Frutos-Puerto S, Miró-Rodríguez C, Pinilla-Gil E. Measurement of tropospheric ozone by digital image analysis of indigotrisulfonate-impregnated passive sampling pads using a smartphone camera. *Microchem J* 2020; 154: 104535. DOI: 10.1016/j.microc.2019.104535.
 - [4] Cai F, Wang T, Lu W, Zhang X. High-resolution mobile bio-microscope with smartphone telephoto camera lens. *Optik* 2020; 207: 164449. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164449.
 - [5] Mai HH, Le TTh. Testing edible oil authenticity by using smartphone based spectrometer. *Computer Optics* 2020; 44(2): 189-194. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-604.
 - [6] Evtikhiev NN, ZlokazovEYu, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. High-speed implementation of holographic and diffraction elements using digital micromirror devices. *Quantum Electron* 2020; 50(7): 667-674. DOI: 10.1070/QEL17295.
 - [7] Grizbil BA, Maksimova LA, Ryabukho VP. Diffraction model of a laser speckle interferometer for measuring micro-displacements of objects with scattering surface. *Computer Optics* 2020; 44(4): 568-577. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-702.
 - [8] Goncharov DS, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Ponomarev NM, Starikov RS. The influence of additional phase modulation of an amplitude liquid crystal STLM on the image recognition characteristics in the invariant optical digital correlator. *Computer Optics* 2019; 43(2): 200-208. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208.
 - [9] Evtikhiev NN, Krasnov VV, Kuzmin ID, Molodtsov DYU, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. QR-code optical encryption in the scheme with spatially incoherent illumination based on two micromirror light modulators. *Quantum Electron* 2020; 50(2): 195-196. DOI: 10.1070/QEL17139.
 - [10] European Machine Vision Association, EMVA Standard 1288. Standard for characterization of image sensors and cameras 3.1 2016. Source: <http://www.emva.org/cms/upload/Standards/>.
 - [11] Rakhshanfar M, Amer MA. Estimation of Gaussian, Poissonian-Gaussian, and processed visual noise and its level function. *IEEE Trans Image Process* 2016; 25(9): 4172-4185. DOI: 10.1109/TIP.2016.2588320.
 - [12] Maggioni M, Katkovnik V, Egiazarian K, Foi A. Non-local transform-domain filter for volumetric data denoising and reconstruction. *IEEE Trans Image Process* 2013; 22(1): 119-133. DOI: 10.1109/TIP.2012.2210725.
 - [13] Liu C, Szeliski R, Kang SB, Zitnick CL, Freeman WT. Automatic estimation and removal of noise from a single image. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 2008; 30(2): 299-314. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1176.
 - [14] Yesilyurt AB, Erol A, Kamisli F, Alatan AA. Single image noise level estimation using dark channel prior. *Proceedings of International Conference on Image Processing 2019*: 2065-2069. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803150.
 - [15] Foi A, Trimeche M, Katkovnik V, Egiazarian K. Practical Poissonian-Gaussian noise modeling and fitting for single-image raw-data. *IEEE Trans Image Process* 2008; 17(10): 1737-1754. DOI: 10.1109/TIP.2008.2001399.
 - [16] Foi A, Alenius S, Katkovnik V, Egiazarian K. Noise measurement for raw-data of digital imaging sensors by automatic segmentation of nonuniform targets. *IEEE Sens J* 2007; 7(10): 1456-1461. DOI: 10.1109/JSEN.2007.904864.
 - [17] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Starikov SN, Krasnov VV, Rodin VG. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of nonuniform target, its accuracy estimation, and application to cameras of different types. *Opt Eng* 2014; 53(10): 102107. DOI: 10.1117/1.OE.53.10.102107.
 - [18] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Starikov SN. Fast measurement of temporal
-

- noise of digital camera's photosensors. Proc SPIE 2015; 9648: 96480R. DOI: 10.1117/12.2194979.
- [19] Nakamura J. Image sensors and signal processing for digital still cameras. Boca Raton: CRC Press; 2006.
- [20] Maître H. From photon to pixel: The digital camera handbook. Hoboken: Wiley; 2017.
- [21] Bertalmío M. Denoising of photographic images and video. Fundamentals, open challenges and new trends. Cham, Switzerland: Springer; 2018.
- [22] Donoho DL, Johnstone IM. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. Biometrika 1994; 81(3): 425-455. DOI: 10.1093/biomet/81.3.425.

Authors' information

Nikolay Nikolaevich Evtikhiev, PhD, prof., Head of Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: signal and image processing, optical information processing, optics, laser physics, pattern recognition. E-mail: k1121@mail.ru.

Alexander Valerievich Kozlov, student, Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests are digital image processing, digital camera noise, holography. E-mail: AlexKozloVV@yandex.ru.

Vitaly Vyacheslavovich Krasnov, PhD, Associate Professor, Institute for Laser and Plasma Technologies, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests are optical encryption, diffraction optical elements synthesis, wavefront reconstruction, signal processing, camera noises. E-mail: vitaly.krasnov@mail.ru.

Rostislav Sergeevich Starikov, PhD, Professor, Institute for Laser and Plasma Technologies, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests are optical processing, optical-digital systems, light modulation, holography. E-mail: rstarikov@mail.ru.

Vladislav Gennadievich Rodin, PhD, Senior Researcher, Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests are optical image processing, diffraction optical elements synthesis, holography. E-mail: holo_mephi@mail.ru.

Pavel Arkadevich Cheremkhin, PhD, Associate Professor, Institute for Laser and Plasma Technologies, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests are digital holography, camera noises, diffraction optics, wavefront reconstruction, signal and image processing. E-mail: cheremhinpavel@mail.ru.

Received September 25, 2020. The final version – December 16, 2020.
