

## **Оценка эффективности измерений шумов фотосенсоров цифровых камер методами автоматической сегментации неоднородной сцены и стандартным методом EMVA 1288**

**Николай Николаевич Евтихийев<sup>1</sup>, Александр Валерьевич Козлов<sup>2</sup>, Виталий Вячеславович Краснов<sup>3</sup>, Владислав Геннадьевич Родин<sup>4</sup>, Ростислав Сергеевич Стариков<sup>5</sup>, Павел Аркадьевич Черёмхин<sup>6</sup>**✉

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>1</sup>k1121@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25927827700>

<sup>2</sup>vitaly.krasnov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6985-9663>

<sup>3</sup>AlexKozloVW@yandex.ru

<sup>4</sup>holo\_mephi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3667-8262>

<sup>5</sup>rstarikov@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602213431>

<sup>6</sup>cheremhinpavel@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-3556-2663>

**Аннотация.** Рассмотрена актуальная для современной фототехники задача характеристики используемых цифровых камер – определение их шумовых характеристик. Освещены вопросы ограничения точности данных, получаемых с помощью цифровых камер, связанные с шумом фотосенсоров. Дан сравнительный анализ двух методов характеристики: стандартного метода на основе стандарта Европейской ассоциации машинного зрения EMVA 1288 и оперативного метода на базе автоматической сегментации неоднородной сцены. Исследованы шумовые характеристики фотосенсоров цифровых камер различного назначения: камеры технического зрения PixeLink PL-B781F, камеры для научных исследований Retiga R6 и бытовая камеры Canon EOS M100. Проанализированы полученные значения точности, скорости расчётов и реализации методов. Показано, что при оценке временных шумов метод автоматической сегментации неоднородной сцены не уступает по точности стандартному методу и может быть реализован за существенно меньший промежуток времени даже с учётом дополнительных снимков для повышения точности.

**Ключевые слова:** временной шум, пространственный шум, цифровые камеры, фотосенсоры, дробовый шум, цифровая обработка изображений

**Для цитирования:** Евтихийев Н. Н., Козлов А. В., Краснов В. В., Родин В. Г., Стариков Р. С., Черёмхин П. А. Оценка эффективности измерений шумов фотосенсоров цифровых камер методами автоматической сегментации неоднородной сцены и стандартным методом EMVA 1288 // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 28–35. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-28-35>

## **Estimation of efficiency of measurement of digital camera photosensor noise by automatic segmentation of non-uniform target method and the standard EMVA 1288**

**Nickolay N. Evtikhiev<sup>1</sup>, Alexander V. Kozlov<sup>2</sup>, Vitaly V. Krasnov<sup>3</sup>, Vladislav G. Rodin<sup>4</sup>, Rostislav S. Starikov<sup>5</sup>, Pavel A. Cheremkhin<sup>6</sup>**✉

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>1</sup>k1121@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=25927827700>

<sup>2</sup>vitaly.krasnov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6985-9663>

<sup>3</sup>AlexKozloVW@yandex.ru

<sup>4</sup>holo\_mephi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3667-8262>

<sup>5</sup>rstarikov@mail.ru, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602213431>

<sup>6</sup>cheremhinpavel@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-3556-2663>

**Abstract.** In this paper important task of estimation of digital camera's noise parameters is considered. Relation of accuracy of data obtained with digital camera and photosensor noise is discussed. Both standard European machine vision association EMVA 1288 and fast automatic segmentation of non-uniform target (ASNT) noise estimation methods are compared. Noise characteristics of machine vision PixeLink PL-B781F, scientific Retiga R6 and amateur mirrorless Canon EOS M100 cameras have been investigated. Accuracy of measurements, speed of calculation and experimental realization has been analyzed. Accuracy of temporal noise estimation by modified ASNT method is no less than that one for standard EMVA 1288. But the ASNT method can be implemented much faster than the standard EMVA 1288 even with additional frames for accuracy improvement.

**Keywords:** noise, temporal noise, spatial noise, digital cameras, photosensors, shot noise, digital image processing

**Введение.** В настоящее время цифровые фото- и видеокамеры являются неотъемлемыми и важными элементами измерительной техники и систем контроля и используются в самых различных областях науки и техники: в физике и астрономии [1], биологии [2], медицине [3]. Также камеры находят применение в различных приложениях при изучении рельефа других планет [4], анализе озонового слоя [5], в микроскопии [6], при анализе масел [7], восстановлении 3D-сцен [8], видеограмметрии [9], кодировании [10], измерении микрорельефов [11], распределений полей скоростей воздушных вихрей [12] и др. К актуальным задачам современной фототехники относится характеристика камер. Под характеристикой понимается определение шумовых характеристик камеры: темновой составляющей временного шума, нахождение показателей неоднородности световой (photo response non-uniformity, PRNU) и темновой (dark signal non-uniformity, DSNU) пространственных составляющих шумов, световых временных шумов с построением кривой зависимости временного шума от уровня сигнала и коэффициента пересчёта электронов в цифровые единицы [13]. Большинство производителей не указывает значения некоторых из перечисленных характеристик даже для камер, используемых при научных исследованиях. Однако подбирая камеру для той или иной научной задачи, необходимо знать шумовые характеристики, чтобы уменьшить их влияние на качество изображения путём компьютерной обработки [14].

Применение стандартных и наиболее точных методов характеристики камеры (например метода, указанного в стандарте Европейской ассоциации машинного зрения EMVA 1288 [13]) подразумевает получение серий световых снимков при разных уровнях освещённости и серии темновых кадров. В зависимости от требуемой точности серии снимков могут содержать разное количество кадров (минимально возможное число кадров – 2), при этом кривая зависимости временных шумов по стандарту должна содержать не менее пятидесяти точек, распределённых по всем возможным уровням сигнала фотосенсора. Таким образом, для удовлетворения минимальных требований стандартного метода необходимо выполнить не менее сотни снимков различных равномерных сцен, по которым рассчитать характеристики камеры. Также нельзя исключать необходимость подавления возможных дефектов шейдинга (shading) [15] и виньетирования [16], при игнорировании которых точность результатов заметно падает.

Таким образом, стандартный метод измерения шумовых параметров камер имеет заметный недостаток: большое время реализации. С целью ускорения процессов нахождения шумовых характеристик в работах [17, 18] предложено несколько методов быстрой характеристики камер на основе сегментации регистрируемых сцен (мишеней). Указанные методы позволяют за значительно меньшие временные интервалы (по сравнению со стандартным методом) оценить шумы камер [19]. В зависимости от необходимых времени и точности оценки шума погрешность полученных результатов может соответствовать погрешности стандартного метода или оставаться на приемлемом уровне.

Цель настоящей статьи – сравнительный анализ полученной точности измерения основной составляющей шумов (временных шумов и времени реализации) фотосенсоров камер различного назначения при использовании стандартного метода (EMVA 1288) и метода автоматической сегментации неоднородной сцены (ACHC).

**Описание модели шумов.** В стандарте EMVA 1288 предложена простая модель классификации и описания шумов фотосенсоров цифровых камер. Все шумы подразделяют на темновые и световые составляющие, подразумевая, что темновые шумы проявляются по большей части при малых уровнях сигнала и описывают случайное рождение электронов и темновые токи. Также шумы подразделяют на временные  $\sigma$  и пространственные. К временным шумам относят флуктуации сигналов в пикселях, вызванные случайными процессами, к пространственным шумам – неоднородности системы регистрации, появляющиеся в результате малых различий элементов системы. Для световой составляющей пространственные шумы – это неоднородность фоточувствительности пикселей (photo response non-uniformity, PRNU), а для темновой составляющей – неоднородность темнового сигнала (dark signal non-uniformity, DSNU). Полный шум на данном уровне сигнала представляют как среднее квадратическое отклонение (СКО) – сумму СКО каждой составляющей шума:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{S}{K} + S^2 PRNU^2 + DSNU^2 + \sigma_{T0}^2 + \mu_{I_{on}} 2^{\frac{T-T_{on}}{T_T}} t_3}, \quad (1)$$

где  $\sigma_n$  – полный шум;  $S$  – сигнал в цифровых единицах;  $K$  – коэффициент пересчёта генерируемых электронов в цифровые единицы;  $PRNU$ ,  $DSNU$  – неоднородности соответственно фоточувствительности пикселей и темнового сигнала;  $\sigma_{T0}$  – темновой временной шум;  $T_{on}$  – опорная температура, при которой оценивали шумовые параметры;  $\mu_{I_{on}}$  – темновой ток при опорной температуре;  $T_T$  – температура, соответствующая удвоению темнового тока;  $T$  – действующее значение температуры;  $t_3$  – время экспозиции.

Поскольку световая составляющая временного шума фактически является дробовым фотонным шумом, она аппроксимируется распределением Пуассона [15]. Следовательно, СКО является корнем из сигнала в пикселях, выраженных в числе генерируемых электронов, который связан с сигналом в цифровых единицах через коэффициент пересчёта  $K$ , зависящий от динамического диапазона и разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Последний член в формуле (1) описывает зависимость темнового временного шума от температуры и времени экспозиции.

**Описание стандартного метода.** Стандартный метод характеристики камер подразумевает получение как временных  $\sigma$ , так и пространственных составляющих шумов фотосенсора [13]. Он заключается в регистрации как минимум пятидесяти серий снимков при различных уровнях освещённости, включая минимальный уровень (с закрытой крышкой цифровой камеры). Каждая серия должна состоять из двух или более кадров. После регистрации серий следует процедура определения шумов.

Для расчётов временных шумов на каждом уровне освещённости применяются следующие формулы:

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

$$\sigma_l^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (L_1[m,n] - L_2[m,n])^2}{2MN}} - (\sigma_d^E)^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_d^E$ ,  $\sigma_l^E$  – темновой и световой временные шумы соответственно;  $D_1[m, n]$ ,  $D_2[m, n]$  – значения сигналов в матрицах двух темновых снимков;  $L_1[m, n]$ ,  $L_2[m, n]$  – значения сигналов в матрицах двух световых снимков с одинаковой яркостью;  $M$ ,  $N$  – горизонтальный и вертикальный размеры матрицы сигналов;  $m$ ,  $n$  – номера строк и столбцов соответственно.

Затем строят зависимости временного шума  $\sigma$  от уровня сигнала  $S$ , по их аппроксимации находят коэффициент пересчёта  $K$ .

Пространственные шумы оценивают на минимальном уровне сигнала для темновой составляющей и на среднем уровне сигнала для световой составляющей по формулам соответственно:

$$DSNU^E = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} (D[m,n] - \bar{D})^2}{(MN-1)}} - (\sigma_d^E)^2; \quad (4)$$

$$PRNU^E = \frac{\sqrt{\sum_{m,n} (L[m,n] - \bar{L})^2 / (MN-1)}}{\bar{L} - \bar{D}} - (\sigma_l^E)^2, \quad (5)$$

где  $\bar{L}$  – среднее значение сигнала равномерно освещённого светового снимка  $L[m, n]$ ;  $\bar{D}$  – среднее значение сигнала темнового снимка  $D[m, n]$ ;  $\sigma^E$  – временные и темновые пространственные шумы.

Стандартный метод обеспечивает высокую точность оценки как временных, так и пространственных шумов, которая может быть существенно увеличена за счёт повышения количества кадров в серии.

Основными недостатками стандартного метода, помимо длительности реализации, являются необходимые дополнительные шаги для получения снимков достаточной однородности, что обычно осложняется эффектами виньетирования [16] и шейдинга (shading) [15], а также неоднородностью используемого светового потока.

Виньетированием называют уменьшение яркости изображения по краям поля зрения вследствие ограничения падения наклонных пучков света оптической системой. Под шейдингом понимают затенение снимка вследствие неравномерности освещения и пыли или грязи на поверхностях линз или самого сенсора. Как виньетирование, так и шейдинг фактически приводят к появлению тёмных участков на изображениях равномерных сцен, что вносит существенную погрешность при проведении экспериментов.

Существует множество [16, 20] различных методов борьбы с подобными дефектами как для цветных, так и для путоновых снимков, например, метод коррекции изображений. В этом методе с целью компенсации виньетирования и шейдинга корректируется только одна фотография. Суть метода состоит в том, чтобы создать так называемое сглаженное изображение и найти его разность с начальным изображением. Для сглаживания определяют фурье-образ исходного изображения и применяют к нему низкочастотный фильтр с последующим обратным фурье-преобразованием. Таким образом, сглаженное изображение будет содержать гладкие (равномерно меняющиеся по яркости) участки исходного изображения, в которых не будет дефектов после вычитания сглаженного изображения из начального. Для получения скорректированного изображения к разности исходного и сглаженного изображения прибавляют постоянную, при этом затенённые участки высветляются:

$$\hat{A}[m, n] = C[m, n] - \text{LowPass}\{C[m, n]\} + \text{const}, \quad (6)$$

где  $\hat{A}[m, n]$  – матрица сигналов скорректированного изображения;  $C[m, n]$  – матрица сигналов исходного изображения;  $\text{LowPass}\{C[m, n]\}$  – матрица сигналов сглаженного изображения;  $\text{const}$  – произвольная постоянная.

Постоянная выбирается с учётом желаемого динамического диапазона. Существуют различные виды низкочастотных фильтров, выбор фильтра в каждом конкретном случае индивидуален и зависит от пространственных частот в фурье-области, где условия затенения доминируют.

**Описание метода АСНС.** Применение этого метода требует всего лишь двух снимков градиентной сцены и позволяет получить всю информацию о временных шумах системы [17]. При этом динамический диапазон сцены должен превышать динамический диапазон камер – так можно получить все возможные уровни сигнала камеры. Процесс реализации метода можно разбить на несколько шагов.

1. Регистрация двух снимков градиентной сцены, удовлетворяющей условию по ширине динамического диапазона  $G_1[m, n]$ ,  $G_2[m, n]$ .

2. Нахождение матриц средних значений  $\bar{G}[m, n]$  и дисперсий  $\sigma_G[m, n]$  на основе несмещённой оценки двух кадров:

$$\bar{G}[m, n] = (G_1[m, n] + G_2[m, n]) / 2; \quad (7)$$

$$\sigma_G[m, n] = \sqrt{\frac{2}{i=1} \sum (G_i[m, n] - \bar{G}[m, n])^2}. \quad (8)$$

3. Проведение процедуры сегментации изображения  $\bar{G}[m, n]$  на группы пикселей в зависимости от сигнала в них. При этом из матрицы дисперсий  $\sigma_G[m, n]$  выбираются соответствующие пиксели для определения средней дисперсии выбранного сигнала.

4. Построение зависимости временного шума от уровня сигнала с использованием всех сегментированных по уровню сигнала групп.

5. Определение коэффициента пересчёта  $K$  путём аппроксимации экспериментальной зависимости выражением

$$\sigma^{ASNT}(S) = \sqrt{(\sigma_d^{ASNT})^2 + S/K}, \quad (9)$$

где  $\sigma^{ASNT}(S)$  – СКО временного шума;  $\sigma_d^{ASNT}$  – СКО темнового временного шума.

Этот метод обеспечивает быстрое и точное определение временных шумов фотосенсора. Если увеличивать число снимков, то можно повысить точность оценки шумов, а изменяя шаг сегментации можно варьировать время получения оценок. Недостатком данного метода является сложность оценки пространственных шумов вследствие высокой неоднородности сцены. Однако обычно временные шумы фотосенсоров камер в несколько раз больше пространственных [13], поэтому в первом приближении можно использовать для оценок качества снимков и для шумоподавления только временные шумы [17].

**Описание экспериментальной установки для измерения временных шумов фотосенсоров камер.** В качестве источника равномерного излучения использовался лазер. Для создания однородного лазерного пучка применялись линза (микрообъектив) и диафрагма, а для уменьшения пространственной когерентности излучения – вращающийся матовый рассеиватель. Роль тестового изображения играл градиентный транспарант. Процессом съёмки управлял компьютер. На установке измеряли шумовые характеристики камер различного типа: камеры технического зрения PixeLink PL-B781F, камеры для научных исследований Retiga R6 и бытовой камеры Canon EOS M100. Эффекты шейдинга и виньетирования подавляли в соответствии со стандартом EMVA 1288. Основные технические характеристики исследуемых камер представлены в табл. 1.

**Камера PixeLink PL-B781F.** Данная камера является КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) устройством, при съёмке в формате «сырых данных» (RAW-формат) умножает сигнал в каждом пикселе на 64, таким образом формат снимка 16 бит вместо реально существующих 10 бит, а максимальный сигнал увеличивается с 1024 до 65536 цифр. ед. (цифровых единиц). Поэтому для обработки достаточно разделить полученный двумерный массив сигналов (снимок в формате 16 бит) на 64.

**Камера Canon EOS M100.** Формально разрядность аналого-цифрового преобразователя КМОП камеры

Canon EOS M100 составляет 16 бит. Однако значительная часть сигналов отсутствует в пределах этого динамического диапазона. Так, после сигнала 33 цифр. ед. следует сигнал 36 цифр. ед., а после сигнала 886 цифр. ед. – 894 цифр. ед. Минимальная и максимальная разницы последовательных сигналов составляют 1 и 8 цифр. ед. соответственно; наиболее часто встречается разница 7 цифр. ед. Поэтому для продолжения работы с изображением массив снимка нормировали на число, рассчитанное с учётом разницы между уникальными сигналами и частотой их использования производителями при обработке снимков. Таким образом разрядность изображения в RAW-формате стала 13,5 бит вместо 16 бит, а максимальный сигнал стал равняться

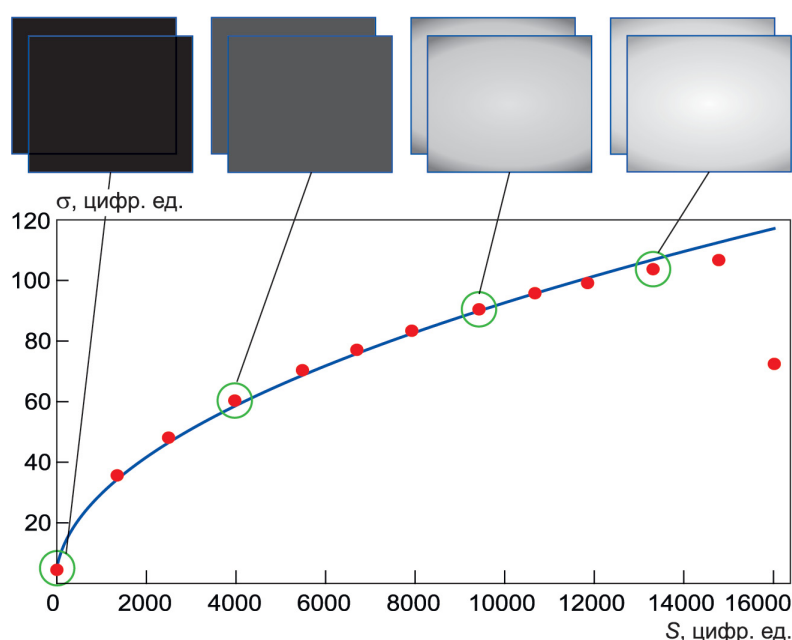


Рис. 1. Результат измерения шумов фотосенсоров камер на основе стандарта EMVA 1288

Fig. 1. Results of measurement of camera photosensor noise by the EMVA Standard 1288

Таблица 1

Технические характеристики исследуемых цифровых камер

| Характеристика             | PixeLink PL-B781F | Retiga R6      | Canon EOS M100 |
|----------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Разрядность АЦП, бит       | 10                | 14             | 13,5           |
| Количество пикселей, млн   | 6,62              | 5,91           | 24,2           |
| Минимальная экспозиция, мс | 0,063             | 0,0006         | 0,25           |
| Размер пиксела, мкм        | 3,5×3,5           | 4,6×4,6        | 3,7×3,7        |
| Тип сенсора                | КМОП*             | ПЗС**          | КМОП*          |
| Цветность                  | Монохромная       | Монохромная    | Цветная        |
| Назначение                 | Машинное зрение   | Научные задачи | Бытовые задачи |

\* Комплементарная структура металл-оксид-полупроводник.

\*\* Прибор с зарядовой связью.

11732 цифр. ед. вместо 65535 цифр. ед. Так как камера Canon EOS M100 – цветная, то использовались только пиксели, соответствующие одному цветовому каналу.

**Камера Retiga R6.** Данная ПЗС-камера (ПЗС – прибор с зарядовой связью) является монохромной и предназначена для решения научных задач.

**Сравнение результатов измерений методом АСНС и стандартным методом по точности, времени измерений и возможности повышения точности.** Для реализации стандартного метода было снято несколько световых и одна темновая серия кадров для каждого из исследуемых

устройств, примеры световых и темновых снимков приведены на рис. 1. С помощью серий снимков, аналогичных показанным на рис. 1, получены значения временного шума. Эти значения и аппроксимированные зависимости временного шума от уровня сигнала представлены на рис. 1 для камеры Retiga R6 и на рис. 2 для камер Pixelink PL-B781F и Canon EOS M100. Зависимости временного шума от уровня сигнала, полученные методом АСНС для двух снимков одной сцены, представлены на рис. 2 для камер Pixelink PL-B781F и Canon EOS M100 и на рис. 3 для камеры Retiga R6.

Результаты измерения временных шумов, а также паспортные данные приведены в табл. 2. Для сравнения точности измерения шумов рассматриваемыми методами рассчитаны погрешности шумовых параметров как СКО по различным сериям измерений для каждой камеры.

Из табл. 2 следует, что данные производителя камер о временных шумах либо полностью отсутствуют, либо представлены не в полной мере, а также, что подавляющее число результатов измерений шумов обоими методами совпадают в пределах погрешности, что свидетельствует о достоверности получаемых результатов. Для обоих методов погрешности коэффициента пересчёта  $K$  совпадают по порядку величины, а погрешности измерения темнового временного шума отличаются, что объясняется малым числом пикселей с темновым уровнем сигнала при съёмке

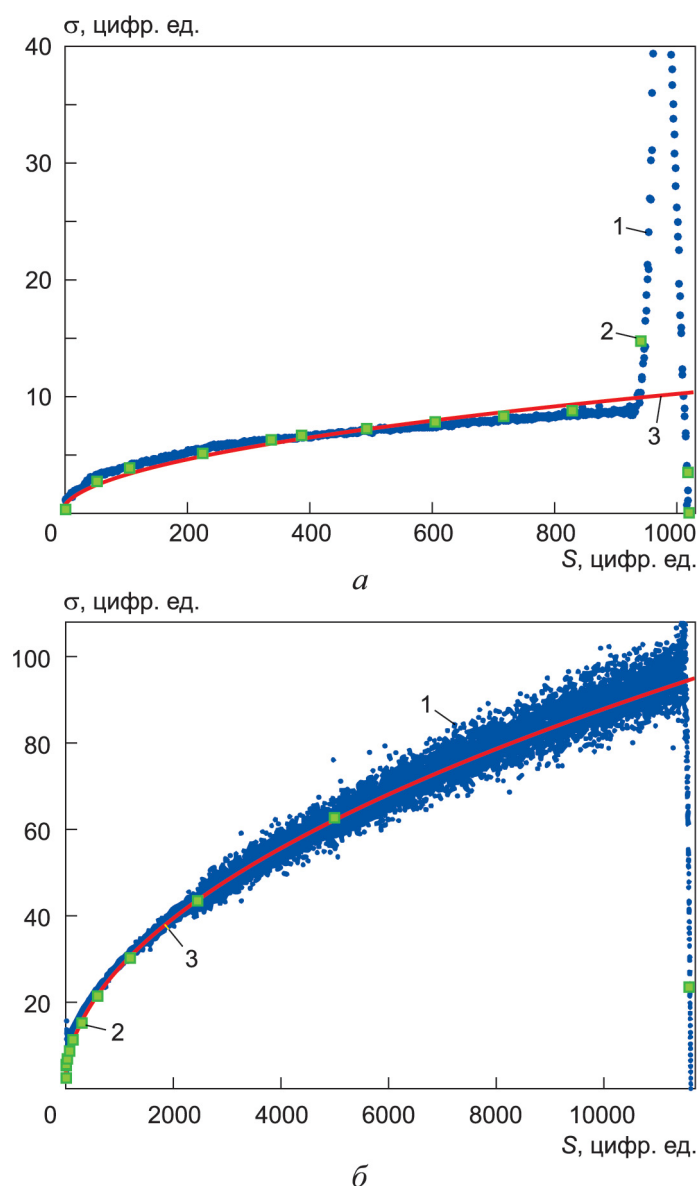


Рис. 2. Зависимости временного шума  $\sigma$  от уровня сигнала  $S$  для камер Pixelink PL-B781F (а) и Canon EOS M100 (б): 1 – метод АСНС; 2, 3 – стандартный метод и его аппроксимация

Fig. 2. Obtained dependencies of temporal noise  $\sigma$  on signal  $S$  value for cameras: Pixelink PL-B781F (a) and Canon EOS M100 (b) 1 – ASNT method; 2, 3 – EMVA Standard 1288 and approximated curve

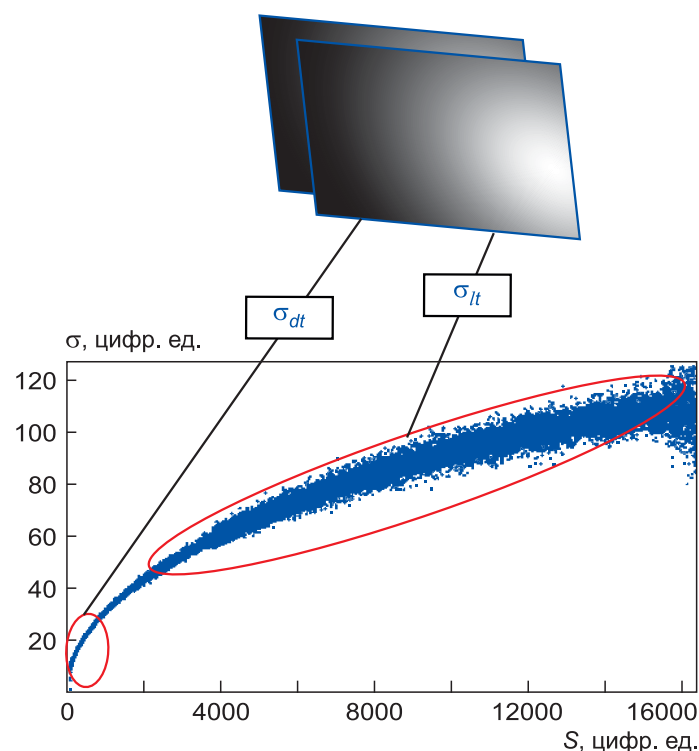


Рис. 3. Результат измерения временных шумов фотосенсора камеры Retiga R6 от уровня сигнала методом АСНС

Fig. 3. Results of measurement of camera Retiga R6 photosensor temporal noise on signal value using automatic segmentation of non-uniform target method

Таблица 2

Результаты измерения временных шумов исследуемых камер методом АСНС и стандартным методом EMVA

| Источник данных   | $K$ , эл./цифр. ед. | $\sigma_{dt}$ , цифр. ед. |
|-------------------|---------------------|---------------------------|
| PixeLink PL-B781F |                     |                           |
| Паспорт           | —                   | менее 1                   |
| EMVA              | $10,7 \pm 0,6$      | $0,35 \pm 0,01$           |
| АСНС              | $10,7 \pm 0,8$      | $0,87 \pm 0,05$           |
| Canon EOS M100    |                     |                           |
| Паспорт           | —                   | —                         |
| EMVA              | $1,28 \pm 0,01$     | $2,479 \pm 0,004$         |
| АСНС              | $1,33 \pm 0,04$     | $2,6 \pm 0,3$             |
| Retiga R6         |                     |                           |
| Паспорт           | более 1,22          | —                         |
| EMVA              | $1,19 \pm 0,04$     | $4,46 \pm 0,01$           |
| АСНС              | $1,2 \pm 0,1$       | $4,4 \pm 0,7$             |

Таблица 3

Время (в секундах) нахождения шумовых характеристик цифровых камер двумя методами

| Метод | PixeLink PL-B781F | Canon EOS M100 | Retiga R6 |
|-------|-------------------|----------------|-----------|
| EMVA  | 3900              | 16950          | 6000      |
| АСНС  | 57                | 401            | 427       |

градиентной сцены методом АСНС (в стандарте EMVA 1288 эти данные получают по снимкам с закрытой крышкой цифровой камеры). Поэтому стандартный метод позволяет с более высокой точностью определить темновой временной шум. Однако при измерении шумов методом АСНС использовалось всего лишь два кадра одной сцены. При большем числе кадров погрешность измерений уменьшается в разы или даже на порядок [17].

Для сравнения скорости получения оценок рассматриваемыми методами измеряли время компьютерной обработки снимков, зарегистрированных камерами. Результаты приведены в табл. 3. Оценки временных затрат проводились в среде MATLAB на устройстве LENOVO (Процессор: Intel(R) Core(TM), I7-4510U CPU 2.00 GHz 2.6 GHz, ОЗУ: 6 ГБ).

Стандартный метод требует значительно больших временных затрат. При этом учитывалось только время расчётов, хотя ещё следует учитывать время подбора экспозиции для каждой серии снимков, чтобы обеспечить эквидистантность точек при построении зависимости временного шума от уровня сигнала. Разница времён расчёта методом АСНС для различных камер в основном связана с разной разрядностью АЦП камер (длительность сегментации прямо пропорциональна количеству разрядов), а также с различным разрешением камер (чем больше пикселей фотосенсора камеры, тем дольше проводится оценка). Второе обстоятельство также обуславливает разницу времён расчёта стандартным методом.

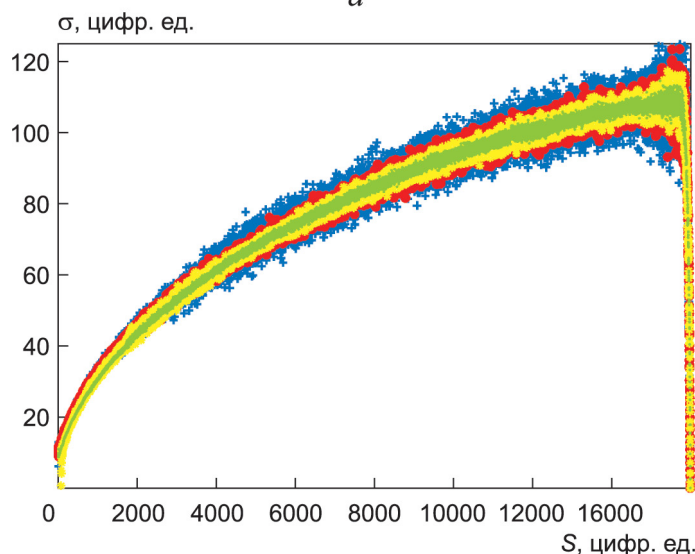
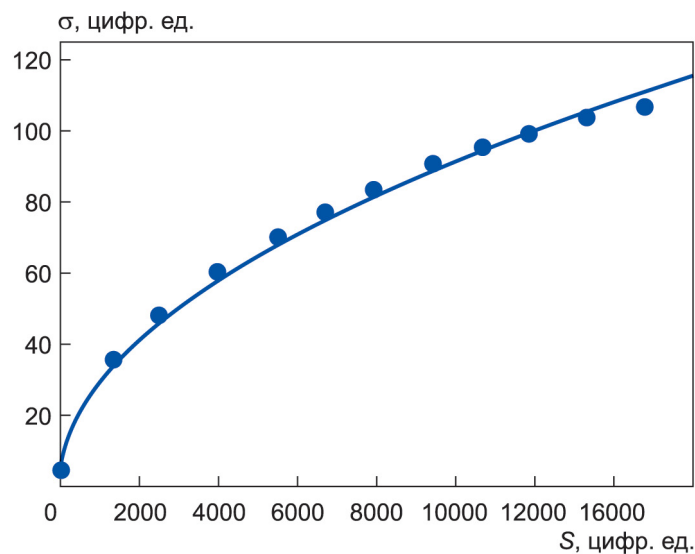


Рис. 4. Зависимости временного шума  $\sigma$  от уровня сигнала  $S$  для камеры Retiga R6, полученные стандартным методом (а) (точки и аппроксимационная кривая) и методом АСНС (б) для 2 (+), 4 (o), 8 (\*) и 16 (•) снимков в серии; при стандартном методе экспериментальные точки совпадают для любого рассмотренного количества снимков

Fig. 4. Obtained dependencies of temporal noise  $\sigma$  on signal  $S$  value for Retiga R6 camera using the EMVA Standard 1288 (a) (dots and approximated curve) and the ASNT method (b) for 2 (+), 4 (o), 8 (\*) and 16 (•) images in each series; experimental dots for the EMVA Standard 1288 are equal each other for all images quantity

В силу того, что камера Canon EOS M100 является цветной, время расчёта увеличивается за счёт времени выделения одного из цветовых каналов, проводимого для каждого зарегистрированного снимка (в табл. 3 это не отражено).

С учётом всех факторов измерение временных шумов, начиная со сборки установки и заканчивая построением зависимости временного шума от уровня сигнала, может

Таблица 4

Коэффициенты пересчёта электронов в цифровые единицы в зависимости от количества снимков в серии

| Метод | 2 снимка  | 4 снимка  | 8 снимков | 16 снимков |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------|
| EMVA  | 1,19±0,04 | 1,18±0,04 | 1,19±0,04 | 1,18±0,04  |
| АЧНС  | 1,21±0,1  | 1,22±0,06 | 1,23±0,03 | 1,22±0,02  |

составить не более 3 и 9 ч методом АЧНС и стандартным методом соответственно. Таким образом, быстродействие метода существенно выше (в 3 раза) быстродействия стандартного метода.

Чтобы рассмотреть возможность увеличения точности рассматриваемых методов, были измерены коэффициенты пересчёта  $K$  для различного числа снимков в сериях: одна серия съёмки градиентной сцены методом АЧНС и множество серий съёмки квазиоднородных сцен стандартным методом. Графики зависимостей временного шума от уровня сигнала приведены на рис. 4 для 2, 4, 8 и 16 снимков в сериях, снятых камерой Retiga R6. Полученные коэффициенты пересчёта  $K$  приведены в табл. 4.

Из рис. 4 и табл. 4 следует, что при использовании стандарта EMVA 1288 точность измерения коэффициента пересчёта не повышается с увеличением числа снимков в серии. При этом точки на графике практически совпадают. Это можно объяснить большим количеством пикселей используемых снимков: даже в серии из двух кадров получается большой статистический массив, поскольку сигнал квазиравномерный, и добавление к такому массиву дополнительных данных уже не приводит к существенным изменениям статистических величин. Для метода АЧНС разброс шума на каждом уровне сигнала с увеличением числа кадров в серии уменьшается, что уменьшает погрешность определения коэффициента пересчёта. Данный факт объясняется тем, что каждый уровень сигнала в градиентном снимке представлен малым количеством пикселей, и дополнительные кадры существенно увеличивают статистику. Это приводит к значительным изменениям зависимости временного шума от уровня сигнала и к уменьшению погрешности определения коэффициента пересчёта.

Таким образом, увеличение числа снимков в каждой серии не всегда приводит к увеличению точности определения временного шума. Однако стандарт EMVA 1288 позволяет оценивать также и пространственные шумы, на погрешность измерения которых число кадров в серии оказывает существенное влияние, поскольку с увеличением числа снимков при усреднении временные шумы уменьшаются по корневому закону от числа снимков и точность оценки пространственных шумов возрастает.

С практической точки зрения при измерении шумов желательнее регистрировать в каждой серии снимков больше требуемого минимума для метода. Это связано с тем, что гистограмма яркости градиентного снимка может быть сильно неравномерной. При этом максимальная точность измерений обеспечивается при равномерной гистограмме.

Поэтому увеличение числа кадров позволяет существенно уменьшить погрешность определения временного шума для каждого уровня сигнала.

**Заключение.** В результате сравнительного анализа скорости реализации и точности двух методов (стандартного и метода АЧНС) характеристики световых и темновых временных шумов фотосенсоров трёх камер различного назначения установили, что полученные результаты измерения временных шумов совпадают для обоих методов в пределах погрешности измерений. Также сравнили потенциальную возможность повышения точности методов путём увеличения количества кадров в серии снимков. Хотя для двух кадров точность метода АЧНС ниже точности стандартного метода, однако увеличение числа кадров позволяет уменьшить погрешность АЧНС-измерений до значений, сравнимых с погрешностью стандартного метода и даже меньше. Так, с увеличением числа кадров в серии снимков до 16 погрешность метода АЧНС уменьшается в пять раз, а погрешность стандартного метода при этом остаётся неизменной, что объясняется особенностями работы методов. Быстродействие двух методов для всех исследуемых камер различается: программная обработка методом АЧНС требует в десятки раз меньше времени, чем при стандартном методе.

Таким образом, для оперативного нахождения временных шумов различных камер целесообразно использовать метод АЧНС, существенно менее времязатратный, чем стандартный метод, что может быть полезно при повышении качества изображений и для оценок достижимого отношения сигнал/шум в конкретных оптико-цифровых системах.

Работа выполнена при частичной поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договор № 15084ГУ/2020).

#### Список литературы

1. *Handbook of Practical Astronomy*, ed. G. Roth, Springer, 2009, 736 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76379-6>
2. Stuurman N., Ronald D., *Biol. Bull.*, 2016, vol. 231, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.1086/689587>
3. *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)*, ed. O. Panykh, Springer, 2012, 602 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10850-1>
4. Thaker A., Patel S., Solanki P., *Planetary and Space Science*, 2020, vol. 184, pp. 104856. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104856>
5. Cerrato-Alvarez M., Frutos-Puerto S., Miró-Rodríguez C., Pinilla-Gil E., *Microchem. J.*, 2020, vol. 154, pp. 104535. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104856>
6. Cai F., Wang T., Lu W., Zhang X., *Optik*, 2020, vol. 207, pp. 164449. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164449>
7. Mai H., Le T., *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 189–194. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-604>
8. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Krasnov V., Kulakov M., Kurbatova E., Molodtsov D., Rodin V., *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9889, pp. 98891M. <https://doi.org/10.1117/12.2227767>

9. Кулеш В. П. Особенности применения видеограмметрии в экспериментальной аэродинамике // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 40–45.  
https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-40-45

10. Евтихийев Н. Н., Краснов В. В., Кузьмин И. Д., Молодцов Д. Ю., Родин В. Г., Стариков Р. С., Черёмхин П. А. Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 2. С. 195–196. https://doi.org/10.1070/QEL17139

11. Абрамов А. Д., Никонов А. И. Измерение параметров микрорельефа на основе корреляционного метода обработки изображений исследуемых поверхностей // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 36–39.  
https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-36-39

12. Мочалов А. А., Вараксин А. Ю., Арбеков А. Н. Измерения полей скорости нестационарных воздушных вихрей методом анемометрии по изображениям частиц // Измерительная техника. 2019. № 3. С. 37–41.  
https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-37-41

13. European Machine Vision Association, EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 3.1, 2016. URL: <http://www.emva.org/cms/upload/Standards/> (дата обращения: 12.12.2020).

14. Rakhshanfar M., Amer M., *IEEE Trans. Image Process.*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 4175–4184.  
https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2588320

15. *Fundamentals of Image Processing*, ed. I. T. Young, J. J. Gerbrands, L. J. van Vliet, Delft, Delft University of Technology, 2007, 113 p.

16. Varuna De Silva, Viacheslav Chesnokov, Daniel Larkin, *Proceedings of Electronic Imaging, Digital Photography and Mobile Imaging XII*, San-Francisco, USA, February 14–18, 2016, Society for Imaging Science and Technology, 2016, pp. 1–5.  
https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.18.DPMI-249

17. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Starikov S., Krasnov V., Rodin V., *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 10, pp. 102107.  
https://doi.org/10.1117/1.OE.53.10.102107

18. Foi A., Alenius S., Katkovnik V., Egiazarian K., *IEEE Sensors Journal*, 2007, vol. 7, pp. 1456–1461.  
https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.904864

19. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Krasnov V., Rodin V., Starikov R., Starikov S., *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9648, pp. 96480R. https://doi.org/10.1117/12.2194979

20. Grunwald M., Laube P., Schall M., Umlauf G., Franz M., *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10395, pp. 103950.  
https://doi.org/10.1117/12.2272559

## References

1. *Handbook of Practical Astronomy*, ed. G. Roth, Springer, 2009, 736 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-76379-6

2. Stuurman N., Ronald D., *Biol. Bull.*, 2016, vol. 231, no. 1, pp. 5–13. https://doi.org/10.1086/689587

3. *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)*, ed. O. Pianykh, Springer, 2012, 602 p.  
https://doi.org/10.1007/978-3-642-10850-1

4. Thaker A., Patel S., Solanki P., *Planetary and Space Science*, 2020, vol. 184, pp. 104856. https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104856

5. Cerrato-Alvarez M., Frutos-Puerto S., Miró-Rodríguez C., Pinilla-Gil E., *Microchem. J.*, 2020, vol. 154, pp. 104535.  
https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104856

6. Cai F., Wang T., Lu W., Zhang X., *Optik*, 2020, vol. 207, pp. 164449. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164449

7. Mai H., Le T., *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 189–194. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-604

8. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Krasnov V., Kulakov M., Kurbatova E., Molodtsov D., Rodin V., *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9889, pp. 98891M. https://doi.org/10.1117/12.2227767

9. Kulesh V. P., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 11, pp. 1091–1097. https://doi.org/10.1007/s11018-019-01554-9

10. Evtikhiev N. N., Krasnov V. V., Kuzmin I. D., Molodtsov D. Yu., Rodin V. G., Starikov R. S., Cheremkhin P. A., *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 2, pp. 195–196.  
https://doi.org/10.1070/QEL17139

11. Abramov A. D., Nikonov A. I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 11, pp. 1086–1090.  
https://doi.org/10.1007/s11018-019-01553-w

12. Mochalov A. A., Varaksin A. Yu., Arbekov A. N., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 242–248.  
https://doi.org/10.1007/s11018-019-01611-3

13. European Machine Vision Association, EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 3.1, 2016, available at: <http://www.emva.org/cms/upload/Standards/> (accessed: 12.12.2020).

14. Rakhshanfar M., Amer M., *IEEE Trans. Image Process.*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 4175–4184.  
https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2588320

15. *Fundamentals of Image Processing*, ed. I. T. Young, J. J. Gerbrands, L. J. van Vliet, Delft, Delft University of Technology, 2007, 113 p.

16. Varuna De Silva, Viacheslav Chesnokov, Daniel Larkin, *Proceedings of Electronic Imaging, Digital Photography and Mobile Imaging XII*, San-Francisco, USA, February 14–18, 2016, Society for Imaging Science and Technology, 2016, pp. 1–5.  
https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.18.DPMI-249

17. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Starikov S., Krasnov V., Rodin V., *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 10, pp. 102107.  
https://doi.org/10.1117/1.OE.53.10.102107

18. Foi A., Alenius S., Katkovnik V., Egiazarian K., *IEEE Sensors Journal*, 2007, vol. 7, pp. 1456–1461.  
https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.904864

19. Cheremkhin P., Evtikhiev N., Krasnov V., Rodin V., Starikov R., Starikov S., *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9648, pp. 96480R. https://doi.org/10.1117/12.2194979

20. Grunwald M., Laube P., Schall M., Umlauf G., Franz M., *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10395, pp. 103950.  
https://doi.org/10.1117/12.2272559

Статья поступила в редакцию 01.01.2021; принята к публикации 01.03.2021.