

## МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.383

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

Поступила в редакцию / Received 01.07.2024

ГРНТИ 47.33.37

Специальность ВАК 2.2.13; 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024

*Научная статья*

### УЧЕТ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ ПРИ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Корнышев Н. П.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)*

**Аннотация** В статье рассматриваются вопросы устранения геометрического шума фотоприемников инфракрасного диапазона, что до сих пор является актуальной задачей, связанной с необходимостью обнаружения малоконтрастных объектов, находящихся в поле видеонаблюдения, на фоне флуктуационного шума и детерминированных помех. Детально рассматривается компенсационный метод борьбы с геометрическим шумом, в частности, так называемая, двухточечная коррекция, основанная на предварительной заводской калибровке матричного фотоприемника при фиксированном времени экспозиции. Изменение времени экспозиции фотоприемника в процессе информативной засветки по отношению к времени экспозиции, использованному на этапе калибровки, приводит к ошибке компенсации, проявляющейся в виде мелкоструктурного шума на изображении. В этой связи методы компенсации геометрического шума, учитывающие возможные изменения времени экспозиции фотоприемника в процессе информативной засветки, рассматриваемые в статье, представляют практический интерес для разработчиков данного класса аппаратуры. В статье достаточно подробно рассматриваются особенности учета времени экспозиции с точки зрения влияния аддитивной (вызванной неравномерностью термогенерации в элементах фотоприемника) и мультипликативной (вызванной неравномерностью чувствительности элементов фотоприемника) составляющих геометрического шума, и приводятся результаты компьютерного моделирования, а также даются рекомендации по применению.

**Ключевые слова:** *геометрический шум, обработка изображений, двухточечная коррекция*

**Для цитирования:** Корнышев Н. П. Учет времени экспозиции при двухточечной коррекции геометрического шума матричного фотоприемника // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 379-390. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

*Research Article*

### ACCOUNTING FOR EXPOSURE TIME WITH TWO-POINT CORRECTION OF FIXED PATTERN NOISE OF A MATRIX PHOTODETECTOR

Kornyshev N. P.

*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)*

**Abstract** The article discusses the issues of eliminating the geometric noise of infrared matrix sensors, which is still an urgent task related to the need to detect low-contrast objects in the video surveillance field against the background of fluctuating noise and deterministic interference. The compensatory method of combating geometric noise is considered in detail, in particular, the so-called two-point correction based on the preliminary factory calibration of the matrix sensor at a fixed exposure time. Changing the exposure time of the matrix sensor in the process of informative illumination in relation to the exposure time used at the calibration stage leads to a compensation error, which manifests itself in the form of fine-grained noise in the image. In this regard, the methods of geometric noise compensation, taking into account possible

changes in the exposure time of the matrix sensor during informative illumination, considered in the article, are of practical interest to developers of this class of equipment. The article discusses in sufficient detail the features of accounting for exposure time from the point of view of the influence of additive (caused by uneven thermal emission in the elements of the matrix sensor) and multiplicative (caused by uneven sensitivity of the elements of the matrix sensor) components of geometric noise, and the results of computer modeling are presented, recommendations for use are given.

**Keywords:** *fixed pattern noise, image processing, two-point correction*

**For citation:** Kornyshev N. P. Accounting for exposure time with two-point correction of fixed pattern noise of a matrix photodetector // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 379-390. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).379-390

## Введение

Геометрический шум (ГШ) или в английской аббревиатуре *FPN*-шум (*fixed pattern noise*) является для конкретного фотоприемника детерминированной помехой, имеющей две составляющих: аддитивную и мультипликативную. Аддитивная составляющая обусловлена неравномерностью термогенерации носителей заряда в элементах матричного фотоприемника. Мультипликативная составляющая обусловлена неоднородностью чувствительности элементов матричного фотоприемника.

Математическая модель, описывающая ГШ, имеет вид линейного уравнения с постоянными коэффициентами:

$$Y=KX+B, \quad (1)$$

где  $Y$  – матрица выходных значений яркости элементов матричного фотоприемника с ГШ,  $B$  – матрица значений аддитивной составляющей ГШ,  $KX$  – матрица значений мультипликативной составляющей ГШ, причем,  $X$  – матрица исходных значений яркости элементов матричного фотоприемника без ГШ, а  $K$  – матрица коэффициентов, характеризующих неравномерность чувствительности каждого элемента фотоприемника [1, 2].

С ГШ обычно борются компенсационными методами. Так, например, метод одноточечной коррекции заключается в вычитании предварительно запомненных (эталонных) значений аддитивной составляющей. Однако, он эффективен только в небольшом диапазоне изменения сигнала относительно эталонного значения.

Более точен метод двухточечной коррекции, заключающийся в вычитании предварительно запомненных значений аддитивной составляющей  $B$  и умножении (или делении) на предварительно рассчитанные коэффициенты  $K$  компенсации мультипликативной составляющей.

Данный метод предусматривает предварительную калибровку матричного фотоприемника видимого диапазона спектра, предусматривающую поочередное перекрытие потока излучения и равномерное облучение фотоприемника при фиксированном времени экспозиции. Получаемые при этом значения яркости элементов кадров изображений  $Y_1$  для перекрытого потока излучения и  $Y_2$  для

равномерно облученного фотоприемника запоминают. Затем рассчитывают коэффициенты  $K$ , характеризующие относительную чувствительность элементов фотоприемника по формуле  $K=Y_2/m_2$ , где  $m_2$  средняя яркость изображения  $Y_2$ . При информативном облучении фотоприемника производят компенсацию ГШ в получаемых при этом цифровых значениях  $Y$  яркости элементов кадра, формируя выходные значения яркости  $X$  элементов кадра по обратному выражению математической модели ГШ:

$$X=(Y-B)/K, \text{ причем, } B=Y_1. \quad (2)$$

Для компенсации ГШ матричного фотоприемника инфракрасного диапазона способ предусматривает нахождение коэффициентов  $K$  из системы уравнений с двумя неизвестными:

$$Y_1=KX_1+B, \quad (3)$$

$$Y_2=KX_2+B. \quad (4)$$

При этом  $X_1=m_1$  и  $X_2=m_2$  – исходные значения яркости элементов матричного фотоприемника без ГШ при, соответственно, равномерном низком и высоком уровне облученности элементов фотоприемной матрицы, где  $m_1$  и  $m_2$  – средние значения яркости изображений  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Из рассмотренной выше системы уравнений следуют значения:

$$K=(Y_2-Y_1)/(m_2-m_1), \quad (5)$$

$$B=(Y_1X_2-Y_2X_1)/(X_2-X_1). \quad (6)$$

Если  $X_1 \rightarrow 0$ , то  $K \approx Y_2/X_2$ ,  $B \approx Y_1$ . Однако, как показывает компьютерное моделирование, приближенное вычисление коэффициентов  $B$  практически не влияет на точность двухточечной коррекции, а приближенное вычисление коэффициентов  $K$  существенно ее ухудшает. Необходимо отметить, что компьютерное моделирование показывает на ограничения в применении рассмотренных выше способов при увеличении динамического диапазона изменения сигнала.

Целью настоящей статьи является обзор вариантов двухточечной коррекции геометрического шума матричного фотоприемника, позволяющих учесть влияние изменения времени его экспозиции в процессе информативной засветки по отношению к времени экспозиции, использованном при калибровке.

### Двухточечная коррекция ГШ с учетом времени экспозиции

Общим недостатком известных компенсационных методов является снижение точности компенсации ГШ фотоприемника при времени экспозиции (накопления) в процессе информативного облучения, отличном от времени экспозиции, использованном в процессе калибровки. Низкая точность обусловлена тем, что,

например, при увеличении времени  $t$  экспозиции фотоприемника в процессе его информативного облучения в пределах рабочего диапазона экспозиций  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$  относительно минимального времени экспозиции  $t_{min}$ , использованного в процессе калибровки, возникает ошибка компенсации ГШ. Ошибка компенсации ГШ в свою очередь объясняется тем, что аддитивная составляющая ГШ прямо пропорциональна времени накопления. На изображении ошибка компенсации проявляется в виде помехи – зернистой структуры. При этом, чем больше задаваемое время накопления  $t$ , тем больше ошибка компенсации и заметнее помеха.

На рисунках 1, 2 показаны экспериментально снятые зависимости математического ожидания сигнала от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции и зависимости математического ожидания сигнала от величины экспозиции фотоприемника при фиксированной температуре.

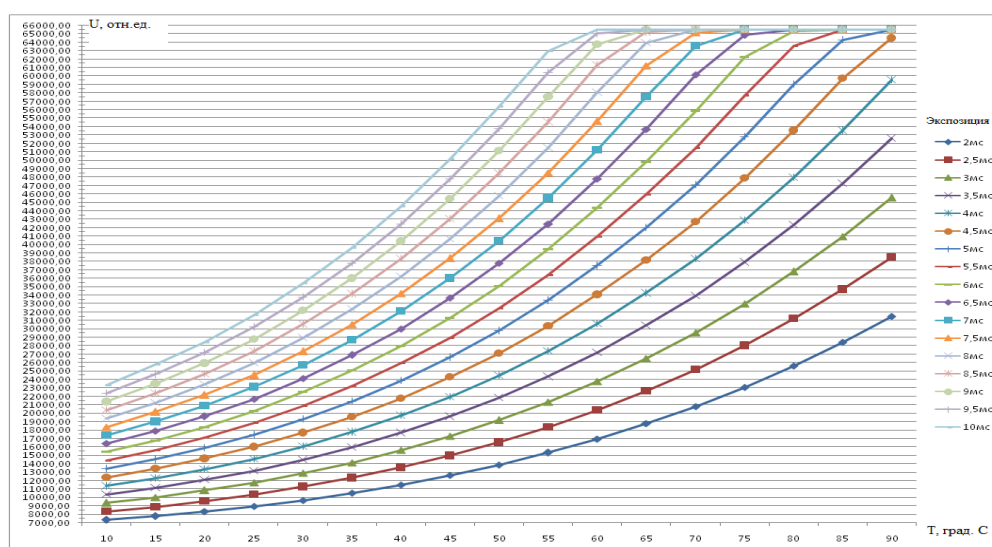


Рисунок 1. Зависимости среднего значения сигнала от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника

Наличие линейной зависимости средней яркости изображения  $m$  от времени экспозиции  $t$  на интервале  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$  позволяет достаточно просто учесть ошибку компенсации ГШ при смене экспозиции, поскольку величина аддитивной составляющей ГШ имеет аналогичный характер зависимости от времени экспозиции.

Ниже рассматривается способ компенсации ГШ фотоприемника [3], инвариантный для устанавливаемого времени  $t$  экспозиции фотоприемника в пределах  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ .

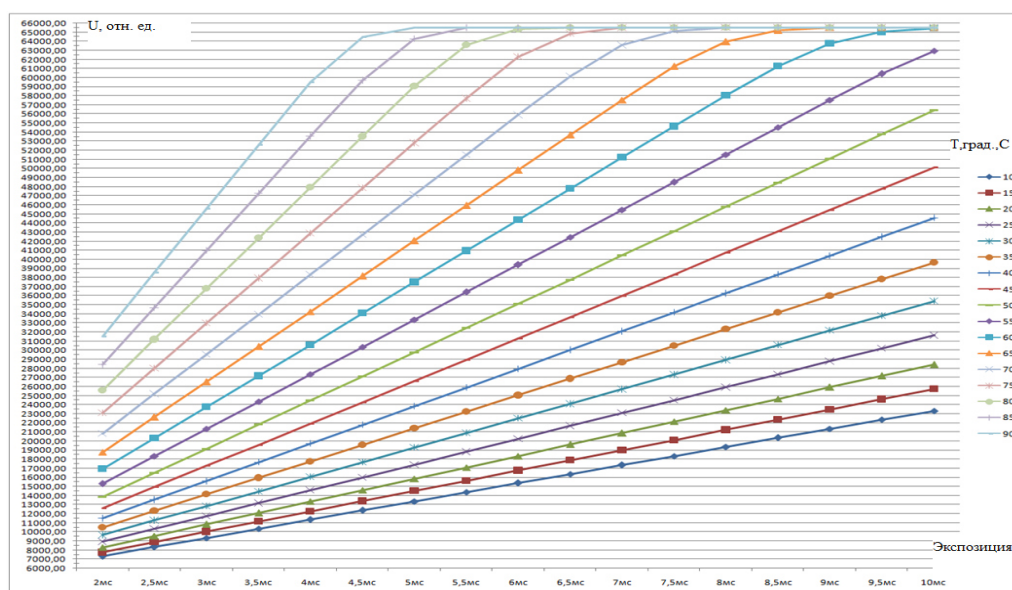


Рисунок 2. Зависимости среднего значения сигнала от величины экспозиции фотоприемника при фиксированной температуре источника излучения

Сущность способа заключается в том, что вычисляются значения яркости дополнительного корректирующего кадра изображения  $\mathbf{dX}$ , соответствующего ошибке компенсации для времени экспозиции  $t$ . При информативной засветке значения  $\mathbf{dX}$  вычитаются из значений яркости соответствующих элементов выходного кадра, формируемого по коэффициентам  $\mathbf{K}$ , рассчитанным на этапе калибровки при времени экспозиции  $t_{min}$ .

Вычисление матрицы  $\mathbf{dX}$  производится, исходя линейной зависимости средней яркости изображения  $m$  от времени экспозиции  $t$  на интервале  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ , соответствующем средним значениям яркости  $m_1$  и  $m_{max}$ . Иными словами, по известным значениям яркости  $\mathbf{X}_1$  и  $\mathbf{X}_2$  производится интерполяция значений яркости элементов дополнительного корректирующего кадра изображения  $\mathbf{dX}$  для времени  $t$  экспозиции.

На практике целесообразно использовать следующую последовательность операций, осуществляемых на этапе калибровки фотоприемника. Дополнительно к изображениям  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$  формируют изображение  $\mathbf{Y}_{1max}$ , получаемое при низком уровне равномерного облучения фотоприемника с экспозицией  $t_{max}$ .

Далее формируются изображения  $\mathbf{X}_1$  и  $\mathbf{X}_2$ , содержащие остаточный ГШ, при экспозициях  $t_{min}$  и  $t_{max}$  после компенсации изображения  $\mathbf{Y}_2$ . Для этого осуществляются преобразования по формулам:

$$\mathbf{X}_1 = (\mathbf{Y}_2 - \mathbf{Y}_1)\mathbf{K} + m_1 \text{ и} \quad (7)$$

$$\mathbf{X}_2 = (\mathbf{Y}_{1max} - \mathbf{Y}_2)\mathbf{K} + m_{1max}, \quad (8)$$

где  $m_1$  и  $m_{1max}$  средние значения яркости элементов в кадрах изображений  $Y_1$  и  $Y_{1max}$ .

Затем вычисляются значения коэффициента  $a$  по формуле:

$$a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min}). \quad (9)$$

Значения яркости дополнительного корректирующего кадра изображения  $dX$ , соответствующего ошибке компенсации для времени экспозиции  $t$  находятся в соответствии с выражением, как взвешенная сумма  $X_2$  и  $X_1$ :

$$dX=aX_2+(1-a)X_1. \quad (10)$$

При информативном облучении с временем экспозиции  $t$  выходные цифровые значения яркости элементов изображения  $X'$  формируют в соответствии с выражениями:

$$X=(Y-Y_1)K+m_1 \quad (11)$$

$$X'=X-dX+m_0, \text{ если } t \neq t_{min} \quad (12)$$

$$X'=X, \text{ если } t=t_{min}, \quad (13)$$

где  $m_0$  – средняя яркость  $dX$ .

Возможен другой вариант способа, учитывающего время экспозиции, который заключается в следующем [4]. Производят предварительную калибровку фотоприемника путем поочередного равномерного облучения элементов фотоприемной матрицы от источника с низким и высоким уровнем излучения при минимальном времени экспозиции фотоприемника  $t_{min}$ .

Полученные при этом значения сигнала яркости изображения  $Y_{1min}$  для низкого уровня облучения и изображения  $Y_{2min}$  для высокого уровня облучения запоминают в цифровой форме и вычисляют средние значения  $m_{1min}$  и  $m_{2min}$  сигнала яркости изображений  $Y_{1min}$  и  $Y_{2min}$ , соответственно.

На этапе калибровки дополнительно задают максимальное время экспозиции  $t_{max}$  при низком уровне равномерной облученности фотоприемника. Получаемые при этом значения сигнала яркости изображения  $Y_{1max}$  запоминают в цифровой форме и вычисляют их среднее значение  $m_{1max}$ .

Непосредственно перед информативной засветкой для заданного в пределах  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$  времени  $t$  экспозиции вычисляют коэффициент  $a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min})$ , а также формируют матрицу эталонного изображения по формуле  $Y_0=aY_{1max}+(1-a)Y_{1min}$  и определяют его среднюю яркость  $m_0$ , а также матрицу коэффициентов  $K$  по формуле  $K=(Y_{2min}-Y_{1min})/(m_{2min}-m_{1min})$ .

Во время информативной засветки выходные цифровые значения яркости  $X$  вычисляют по формуле  $X=(Y-Y_0)/K+m_0$ .

Таким образом, идея данного способа, как и предыдущего, заключается в учете изменения аддитивной составляющей ГШ при смене времени экспозиции. Максимальное изменение аддитивной составляющей ГШ фиксируется при максимальном времени экспозиции  $t_{max}$  в эталонном изображении  $Y_{1max}$ .

Промежуточные значения изменений аддитивной составляющей ГШ линейно интерполируются по формуле  $Y_0 = aY_{1max} + (1-a)Y_{1min}$  при вычислении матрицы эталонного изображения по формуле  $Y_0$ , используемого при формировании выходного изображения  $X$ .

Однако помимо аддитивной составляющей в ГШ имеется мультипликативная составляющая, которая также как и аддитивная составляющая, изменяется при изменении экспозиции, что не учитывается в способах, рассмотренных выше. Отсутствие учета мультипликативной составляющей ведет к недостаточной точности компенсации ГШ при смене экспозиции, что особенно сильно сказывается при увеличении диапазона времени  $[t_{min}; t_{max}]$ .

Повышение точности компенсации геометрического шума матричного фотоприемника в процессе двухточечной коррекции при смене времени экспозиции возможно с учетом изменения не только аддитивной, но и учетом изменения мультипликативной составляющей ГШ [5].

Это достигается за счет дополнительного запоминания в цифровой форме значений яркости элементов эталонного изображения  $Y_{2max}$ , получаемого на этапе калибровки при максимальном времени экспозиции  $t_{max}$  и высоком уровне равномерной облученности фотоприемника, и определения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей  $K_{max}$  для максимального времени экспозиции  $t_{max}$ .

В свою очередь, используя значения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей  $K_{min}$  и  $K_{max}$  для границ диапазона  $[t_{min}; t_{max}]$  за счет дополнительной линейной интерполяции по формуле  $K = aK_{max} + (1-a)K_{min}$  вычисляются значения коэффициентов компенсации мультипликативной составляющей  $K$  для устанавливаемых времен экспозиции  $t$ .

Указанные операции позволяют учесть изменения не только аддитивной, но и мультипликативной составляющей ГШ, происходящие при смене времени  $t$  экспозиции фотоприемника в пределах  $t_{min} \leq t \leq t_{max}$ , что обеспечивает повышение точности компенсации ГШ. Кроме этого, достигается расширение возможного диапазона экспозиции  $[t_{min}; t_{max}]$ , при котором обеспечивается качественная компенсация ГШ.

Способ осуществляется следующим образом. Поток излучения, проходит через объектив на фотоприемник ИК-камеры. Время экспозиции  $t$  в пределах

$t_{min} \leq t \leq t_{max}$  задается в ИК-камере. Значения  $t$ ,  $t_{min}$  и  $t_{max}$  вводятся в компьютер в ручном режиме.

Калибровка камеры осуществляется при  $t=t_{min}$  и при  $t=t_{max}$  с использованием излучателя, формирующего равномерный фон при низкой и высокой температуре по модели абсолютно черного тела (АЧТ).

Получаемые в процессе калибровки изображения  $Y_{1min}$  для  $t_{min}$  и  $Y_{1max}$  для  $t_{max}$  при низкой температуре АЧТ, а также  $Y_{2min}$  для  $t_{min}$  и  $Y_{2max}$  для  $t_{max}$  при высокой температуре АЧТ последовательно преобразуются ИК-камерой в электрический сигнал, который в свою очередь преобразуется в цифровую форму стандартным устройством видеозаписи и последовательно вводится в компьютер.

Введенные в компьютер исходные цифровые значения яркости элементов изображений  $Y_{1min}$ ,  $Y_{1max}$ ,  $Y_{2min}$ ,  $Y_{2max}$ , а также значения  $t$ ,  $t_{min}$  и  $t_{max}$  обрабатываются программным путем. При этом вычисляются средние значения  $m_{1min}$ ,  $m_{1max}$ ,  $m_{2min}$ ,  $m_{2max}$  яркости элементов в кадрах изображений  $Y_{1min}$ ,  $Y_{1max}$ ,  $Y_{2min}$ ,  $Y_{2max}$ , а также рассчитываются матрицы коэффициентов компенсации по формулам  $K_{min}=(Y_{2min}-Y_{1min})/(m_{2min}-m_{1min})$  и  $K_{max}=(Y_{2max}-Y_{1max})/(m_{2max}-m_{1max})$ .

Кроме этого определяют значение коэффициента  $a$  в соответствии с выражением  $a=(t-t_{min})/(t_{max}-t_{min})$  для устанавливаемого времени экспозиции и вычисляют интерполированные значения аддитивной составляющей ГШ в виде матрицы  $Y_0=aY_{1max}+(1-a)Y_{1min}$  и определяют ее среднее значение  $m_0$ , а также вычисляют интерполированные значения коэффициентов компенсации  $K=aK_{max}+(1-a)K_{min}$  мультипликативной составляющей.

В процессе информативной засветки фотоприемника получают исходное изображение  $Y$ , содержащее аддитивную и мультипликативную составляющие геометрического шума. С использованием полученных интерполированных значений  $Y_0$  и  $K$  производят двухточечную коррекцию исходного изображения  $Y$ , получая выходное изображение  $X$  в соответствии с выражением  $X=(Y-Y_0)/K+m_0$ .

На рисунке 3 приведены примеры изображений и профилограммы яркости вдоль строки, получаемые при двухточечной коррекции с учетом времени экспозиции фотоприемника.

На рисунке 4 показаны профилограммы яркости выделенной строки изображения и обработанного методом двухточечной коррекции без учета времени экспозиции (профилограммы 1), а также обработанного с учетом времени экспозиции (профилограммы 2).

По горизонтальной оси графиков показаны номера элементов строки изображения, по вертикальной оси графиков показаны значения яркости в относительных единицах при 16-разрядном их кодировании.



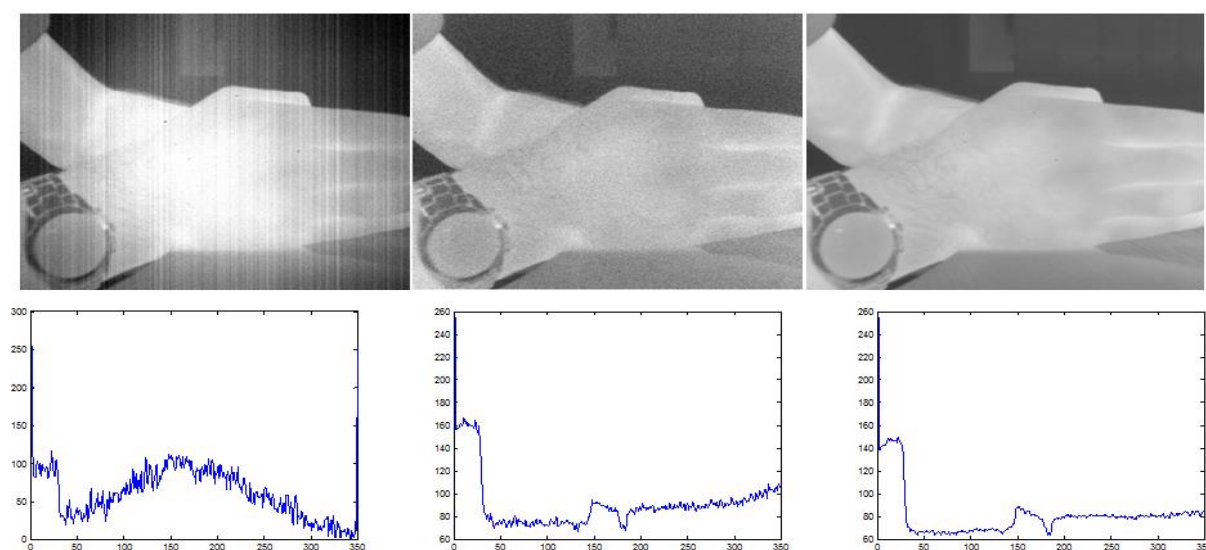


Рисунок 3. Исходное, содержащее ГШ (слева), и результирующие изображения и профилограммы яркости вдоль строки, полученные без учета времени экспозиции (в центре) и с учетом времени экспозиции (справа) при времени экспозиции  $t_{min}=3\text{мс}$  в процессе калибровки фотоприемника и времени экспозиции  $t=6\text{мс}$  в процессе информативного облучения

При этом калибровка производилась для низкого уровня облученности с температурой 10С и высокого уровня облученности с температурой 50С. Время экспозиции при калибровке  $t_{min}=2\text{мс}$  и  $t_{max}=10\text{мс}$ . Информативная засветка производилась при  $t=7\text{мс}$ .

Как видно из представленных графиков, учет изменения обеих составляющих ГШ обеспечивает существенное уменьшение уровня геометрического шума по сравнению со способом, учитывающим только аддитивную составляющую ГШ, что позволяет в свою очередь существенно расширить диапазон используемых значений времени экспозиции. Компьютерное моделирование в среде MATLAB показывает, что учет изменения двух составляющих ГШ обеспечивает не менее чем двукратное увеличение диапазона экспозиции.

### Заключение

Рассмотренные методы двухточечной коррекции позволяют учесть изменение времени экспозиции при информативной засветке матричного фотоприемника по отношению к времени экспозиции, использованному при его калибровке.

Методы отличаются объемом калибровочных операций, а также объемом памяти, необходимым для хранения эталонных изображений, и объемом вычислений при информативной засветке.

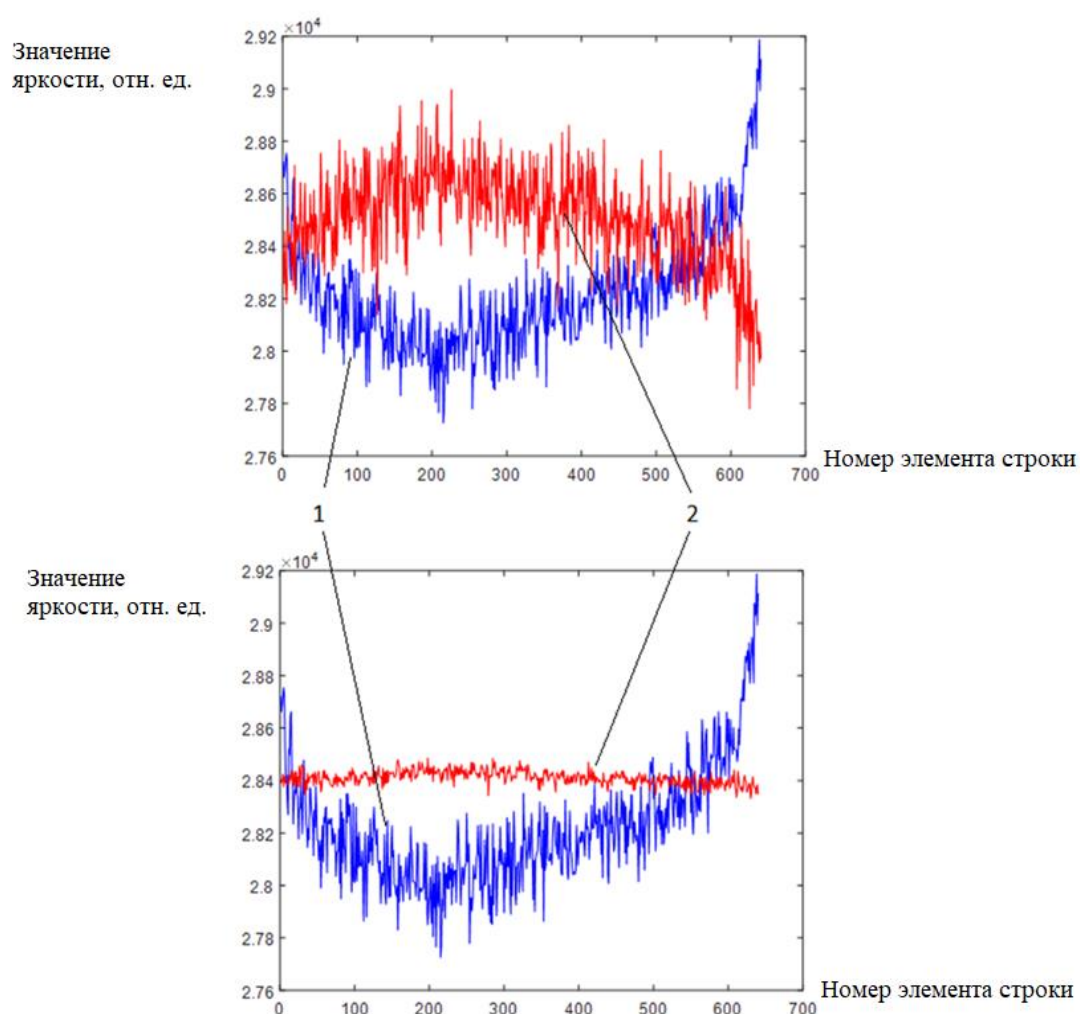


Рисунок 4. Профилограммы яркости выделенной строки изображения, полученного при информативной засветке с  $t=7\text{мс}$  и обработанного методом двухточечной коррекции без учета времени экспозиции при калибровке с  $t_{\min}=2\text{мс}$  (профилограмма 1), а также обработанного с учетом времени экспозиции при калибровке с  $t_{\min}=2\text{мс}$  и  $t_{\max}=10\text{мс}$ . (профилограммы 2). Профилограмма 2 сверху соответствуют учету изменения только аддитивной составляющей ГШ, а профилограмма 2 внизу соответствуют учету изменения, как аддитивной, так и мультипликативной составляющей ГШ

Однако, учет изменения не только аддитивной, но и мультипликативной составляющей геометрического шума, происходящего при смене времени экспозиции фотоприемника в пределах заданного диапазона, обеспечивает повышение точности его компенсации в более широком диапазоне изменения времени экспозиции в процессе информативной засветки матричного фотоприемника.

### Список литературы

1. Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. Москва: Радио и связь, 1986. С. 16-23.
2. Брондз Д. С., Харитонов Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-порядка // Журнал радиоэлектроники. 2008. 11. 2.
3. Корнышев Н. П., Лукин К. Г., Сенин А. С., Степанов Ю. В., Головкин С. Н. Патент № 2679547 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/33 (2006.01), H04N 5/357 (2011.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника: № 2018109050: заявл. 03.13.2018: опубл. 02.11.2019 / заявитель Закрытое акционерное общество «ЭЛСИ». 11 с.
4. Корнышев Н. П., Лукин К. Г., Сенин А. С. Патент № 2711723 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/337 (2011.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника: № 2019134818: заявл. 29.10.2019: опубл. 21.01.2020 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 11 с.
5. Корнышев Н. П. Патент № 2688616 Российская Федерация, МПК G06T 5/00 (2024.01), G06T 7/80 (2024.01), H04N 25/60 (2024.01). Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника, инвариантный к времени экспозиции: № 2023125439: заявл. 04.10.2023: опубл. 09.04.2024 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». 13 с.

### References

1. Khromov L. I., Lebedev N. V., Tsitsulin A. K., Kulikov A. N. Tverdotel'noe televidenie. Televizionnye sistemy s peremennymi parametrami na PZS i mikroprocessorah [Solid-state television. Television systems with variable parameters on CCD and microprocessors]. Moscow: Radio and Communications, 1986. P. 16-23.
2. Brondz D. S., Kharitonova E. N. Korrekciya geometricheskogo shuma MFPU s pomoshch'yu approksimacii metodom naimen'shih kvadratov peredatochnyh harakteristik matricy polinomom T-poryadka [Correction of the geometric noise of the MFPU using the least squares approximation of the transfer characteristics of the matrix by a T-order polynomial] // Journal of radio electronics. 2008. 11. 2.
3. Kornyshev N. P., Lukin K. G., Senin A. S., Stepanov Yu. V., Golovkin S. N. Patent No. 2679547 Russian Federation, IPC G06T5/00 (2006.01), G06T 7/80 (2017.01), H04N 5/33 (2006.01), H04N 5/357 (2011.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector]: No. 2018109050: application 03.13.2018: publ. 02.11.2019 / applicant: Closed Joint Stock Company "ELSI". 11 p.
4. Kornyshev N. P., Lukin K. G., Senin A. S. Patent No. 2711723 Russian Federation, IPC G 0 5/00 (2006.01), G0 G T 7/80 (2017.01), H04N 5/337 (2011.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector]: No. 2019134818: application 29.10.2019: publ. 21.01.2020 / applicant: the Federal state budgetary educational institution of higher education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 11 p.

5. Kornyshev N. P. Patent No. 2688616 Russian Federation, IPC G06T5/00 (2024.01), G06T 7/80 (2024.01), H04N 25/60 (2024.01). Sposob kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika, invariantnyj k vremeni ekspozicii [Method for compensating geometric noise of a matrix photodetector, invariant to exposure time]: No. 2023125439: application 04.10.2023: published 09.04.2024 / applicant: Federal state budgetary educational institution of higher education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 13 p.

#### **Информация об авторах**

*Корнышев Николай Петрович* – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, [Nikolai.Kornishev@novsu.ru](mailto:Nikolai.Kornishev@novsu.ru)