

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИОННОГО ШУМА НА ПРОЦЕСС КОМПЕНСАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА ФОТОПРИЕМНИКА МЕТОДОМ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КОРРЕКЦИИ

Н.П.Корнышев

EFFECT OF FLUCTUATION NOISE ON THE PROCESS OF COMPENSATION OF FIXED PATTERN NOISE OF THE PHOTODETECTOR BY THE TWO-POINT CORRECTION METHOD

N.P.Kornyshev

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, nikolai.kornishev@novsu.ru

Обсуждается аддитивно-мультипликативная модель геометрического шума фотоприемника инфракрасного диапазона и анализируется влияние флуктуационного шума на процесс двухточечной коррекции. Рассматривается метод формирования реальных тестовых изображений, а также метод компьютерного моделирования тестовых эталонных изображений равномерного фона с геометрическим шумом в смеси с флуктуационным. Исследуется раздельное влияние составляющих флуктуационного шума на величину остаточного геометрического шума. Описываются результаты компьютерного моделирования, показывающие возможность возникновения корреляции между флуктуационными составляющими шума, которые учитываются при вычислении коэффициентов компенсации и в процессе самой компенсации, что приводит к изменению характера дисперсии остаточного геометрического шума в изображениях, соответствующих промежуточным значениям средней яркости между опорными точками. Приводятся графики зависимостей и примеры реальных и компьютерных тестовых изображений геометрического шума фотоприемника.

Ключевые слова: геометрический шум, фотоприемник, компьютерное моделирование

Для цитирования: Корнышев Н.П. Влияние флуктуационного шума на процесс компенсации геометрического шума фотоприемника методом двухточечной коррекции // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.64–69.
DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).64-69](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).64-69)

The article discusses an additive-multiplicative model of fixed pattern noise of an infrared photodetector and analyzes the effect of fluctuation noise on the process of two-point correction. The method of forming real test images is considered, as well as the method of computer simulation of test reference images of a uniform background with fixed pattern noise mixed with fluctuation. The possibility of studying their separate influence on the amount of residual fixed pattern noise is shown. The results of computer simulation are presented, showing the possibility of a correlation between the fluctuation components of noise, which are taken into account when calculating compensation coefficients and in the process of compensation itself, which leads to a change in the nature of the dispersion of residual fixed pattern noise in images corresponding to intermediate values of average brightness between reference points. Dependency graphs and examples of real and computer test images of fixed pattern noise of the photodetector are given.

Keywords: fixed pattern noise, photodetector, computer simulation

For citation: Kornyshev N.P. Effect of fluctuation noise on the process of compensation of fixed pattern noise of the photodetector by the two-point correction method // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.64–69.
DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).64-69](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).64-69)

Геометрический шум (ГШ), или в английской аббревиатуре — FPN-шум (*fixed pattern noise*), является для конкретного фотоприемника детерминированной помехой, имеющей две составляющие: аддитивную и мультипликативную. Аддитивная составляющая обусловлена неравномерностью термогенерации носителей заряда в элементах матричного фотоприемника. Мультипликативная составляющая вызвана неоднородностью чувствительности элементов матричного фотоприемника [1,2].

В матричной форме записи математическая модель, описывающая сигнал с ГШ, представляет собой линейное уравнение с постоянными коэффициентами и имеет следующий вид: $Y = KX + B$, где Y — матрица выходных значений сигнала яркости матричного фотоприемника с ГШ, B — матрица аддитивной составляющей ГШ, характеризующая для каждого элемента неравномерность термогенерации, X — матрица значений сигнала яркости

от элементов матричного фотоприемника без ГШ, а K — матрица коэффициентов, характеризующих неравномерность чувствительности для каждого из этих элементов, т. е. мультипликативную составляющую ГШ [1,2].

Существует целый ряд методов борьбы с геометрическим шумом [1–11]. Однако наиболее распространенными являются компенсационные методы. Эффективный метод компенсации геометрического шума матричного фотоприемника инфракрасного диапазона, основанный на использовании рассмотренной выше математической модели ГШ, описан на с.3,4 работы [12]. Согласно данному способу аддитивную и мультипликативную составляющие компенсируют по обратному выражению $X = (Y - B)/K$, причем $K = (Y_2 - Y_1)/(X_2 - X_1)$, $B = (Y_1X_2 - Y_2X_1)/(X_2 - X_1)$ вычисляются из системы уравнений для двух опорных точек передаточной характеристики фотоприемника: «холодной» — $Y_1 = KX_1 + B$ и «горячей» — $Y_2 = KX_2 + B$.

Обычно на практике принимают $B \approx Y_1$, что соответствует случаю $X_1 \rightarrow 0$. В процессе калибровки фиксируют эталонные изображения Y_1 и Y_2 , получаемые при поочередном равномерном облучении фотоприемника от источника, характеристикам абсолютно черного тела (АЧТ) с температурами t_1 и t_2 , соответствующими «холодной» и «горячей» точке.

Значения опорных точек передаточной характеристики X_1 , X_2 выбирают из номенклатуры значений средней яркости эталонных изображений (рис.1). При этом в процессе калибровки средние яркости X_1 и X_2 определяют как средние значения m_1 и m_2 матриц изображений Y_1 и Y_2 .

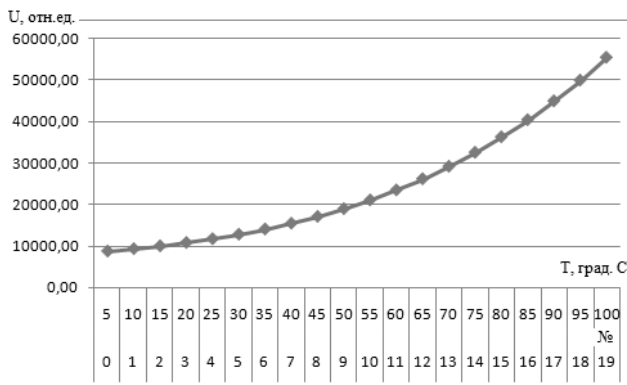


Рис.1. Средние значения сигнала от равномерного фона в зависимости от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника

Таким образом, сущность рассматриваемого способа коррекции заключается в предварительной калибровке матричного фотоприемника, выполняемой путем поочередного равномерного его облучения от источников с низким и высоким уровнем излучения. Получаемые при этом цифровые значения сигнала яркости кадров изображений Y_1 — для низкого и Y_2 — для высокого уровня облученности фотоприемника запоминают и рассчитывают средние значения яркости m_1 и m_2 для изображений Y_1 и Y_2 соответственно.

Далее для каждого элемента матричного фотоприемника рассчитывают значения коэффициентов K по формуле $K = (Y_2 - Y_1)/(m_2 - m_1)$. При информативном облучении фотоприемника производят компенсацию ГШ по формуле $X = (Y - Y_1)/K + m_1$. Добавление значения m_1 при этом обеспечивает восстановле-

ние средней яркости изображения, теряемой при вычитании значений Y_1 . Данный метод в литературе известен как метод двухточечной коррекции.

Для получения как количественной, так и качественной оценки результатов коррекции удобно использовать тестовое изображение, составленное из набора вертикальных полос одинаковой ширины, «вырезаемых» из исходных эталонных изображений, соответствующих рабочим температурам. Количество полос и диапазон температур подбирается экспериментально, в частности, наиболее удобным для использования оказалось тестовое изображение из 7 полос (рис.2) для интервала температур 10–70°C с шагом 10°C [13–15]. Кроме этого, данное тестовое изображение позволяет оценить точность коррекции ГШ по динамическому диапазону возможного изменения сигнала (температуры) при времени экспозиции от 2 до 5,5 с [16].

Качественная оценка результатов коррекции ГШ производится визуально по изображению, а для количественной оценки используется дисперсия и соответствующее среднеквадратическое отклонение (СКО) ГШ по полю изображения.

Однако реальный сигнал фотоприемника кроме геометрического шума дополнительно содержит аддитивный флуктуационный шум. Его влияние на процесс компенсации геометрического шума фотоприемника изучен недостаточно. Целью настоящей статьи является рассмотрение влияния аддитивного флуктуационного шума на процесс компенсации геометрического шума фотоприемника методом двухточечной коррекции.

К сожалению, по реальным тестовым изображениям практически невозможно отдельно оценить изменения геометрического и флуктуационного шума в выходном сигнале фотоприемника. Однако тестовые изображения могут быть получены путем компьютерного моделирования, исходя из указанной выше математической модели.

Алгоритм формирования тестового изображения заключается в следующем. Для моделирования аддитивной составляющей ГШ генерируется вектор-строка B_0 , m элементов которой представляют собой случайные числа с дисперсией D_1 , равномерно распределенные на интервале (0,1). Для формирования двумерного массива B размером $m \times n$ элементов генерация вектор-строки B_0 повторяется n раз.

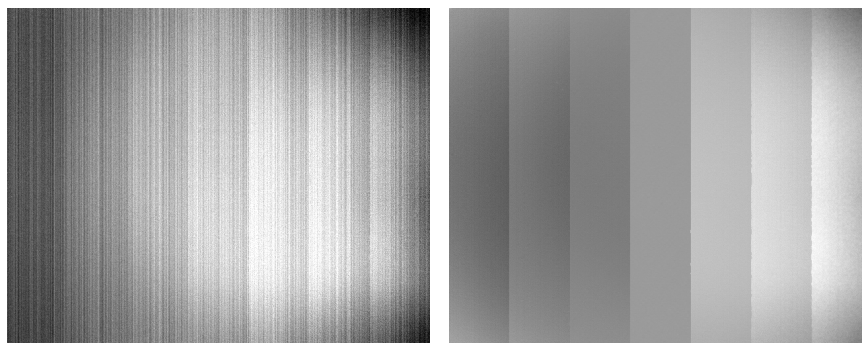


Рис.2. Тестовое изображение «7 полос»: исходное (слева), результат коррекции (справа)

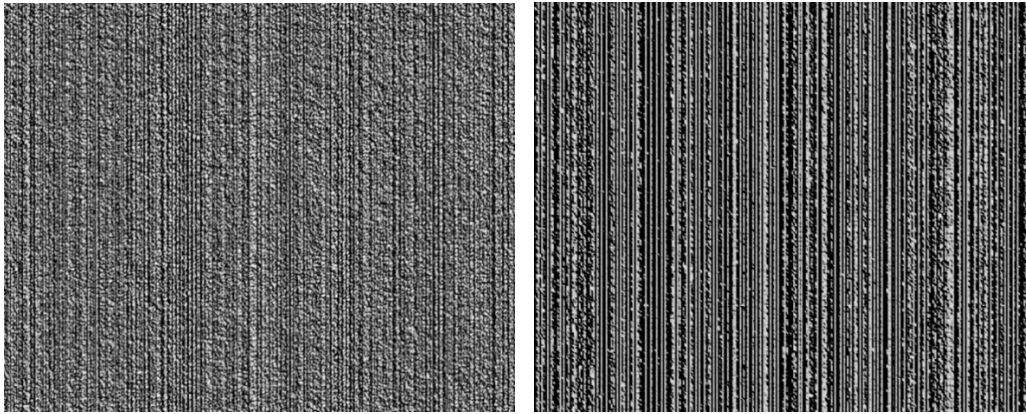


Рис.3. 3D-изображение реального (слева) и смоделированного (справа) ГШ

Для моделирования мультипликативной составляющей аналогичным образом генерируется вектор-строка K_0 , содержащая случайные числа с дисперсией D_2 . Для формирования двумерного массива K размером $m \times n$ элементов генерация вектор-строки K_0 также повторяется n раз.

Исходный сигнал равномерного фона задается постоянной величиной $X > 0$, соответствующей средней яркости моделируемого изображения. Таким образом, выходной сигнал фотоприемника, содержащего геометрический шум, определится в соответствии с его математической моделью по формуле $Y = KX + B$.

Данное выражение не учитывает присутствия флуктуационного шума (ФШ), для моделирования которого дополнительно генерируется массив X_R размером $m \times n$ элементов, содержащий нормально распределенные случайные числа с нулевым математическим ожиданием и заданным СКО – a . С учетом флуктуационного шума X_R выходной сигнал фотоприемника соответствует выражению $Y_{\text{вых}} = Y + X_R$.

На рис.3 показаны примеры 3D-изображений реального и смоделированного геометрического шума.

Для проведения эксперимента исходно генерировались $n = 7$ тестовых массивов геометрического шума в аддитивной смеси с флуктуационным шумом $Y_{\text{вых}} = KX_n + B + X_{Rn}$ с соответствующими графикам рис.1 нарастающими значениями средней яркости X_n , где $n = 1, 2, \dots, 7$.

Далее при компьютерном моделировании процесса компенсации геометрического шума в смеси с флуктуационным был исследован метод двухточечной коррекции с использованием данных массивов $Y_{\text{вых}7}$, $Y_{\text{вых}1}$. При этом массив коэффициентов для компенсации мультипликативной составляющей вычислялся с использованием опорных точек (массивов) $n = 1$ и $n = 7$ по формуле $k = (Y_{\text{вых}7} - Y_{\text{вых}1}) / (m_7 - m_1)$, где m_1 и m_2 — средние значения яркости для изображений $Y_{\text{вых}7}$ и $Y_{\text{вых}1}$, а для компенсации аддитивной составляющей использовался массив $Y_{\text{вых}1}$. В результате скомпенсированные массивы X_n восстанавливались по формуле $X_n = (Y_{\text{вых}n} - Y_{\text{вых}1}) / k$.

Как видно из вышеприведенных выражений, при вычислении коэффициентов компенсации k и в процессе самой компенсации с использованием

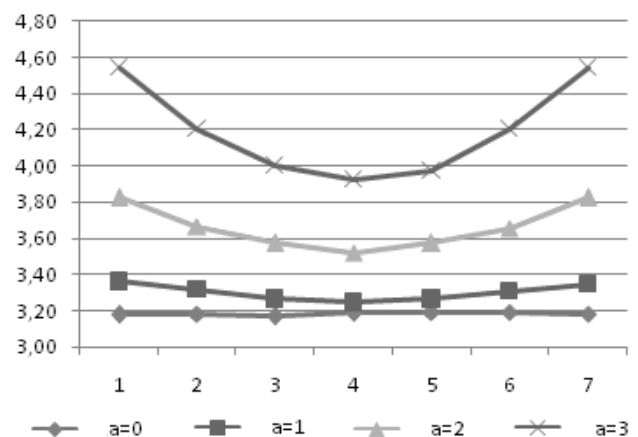
реальных массивов $Y_{\text{вых}n}$ происходит учет присутствующих в них флуктуационных составляющих X_{Rn} .

Исследовалась зависимость СКО остаточного шума в скомпенсированных массивах при различном уровне флуктуационной составляющей в исходных тестовых изображениях.

Компьютерное моделирование показало проявление различного характера изменения СКО в скорректированных тестовых изображениях в зависимости от ее уровня.

Так, при отсутствии флуктуационной составляющей, что соответствует значению $a = 0$, уровень остаточного геометрического шума остается практически постоянным во всех тестовых изображениях со средними уровнями яркости от m_1 до m_7 . При увеличении уровня флуктуационной составляющей до значений, близких к СКО составляющей геометрического шума, наблюдается уменьшение уровня остаточного геометрического шума в тестовых изображениях по направлению от крайних опорных точек $n = 1$ и $n = 7$ к середине динамического диапазона яркостей, соответствующей $n = 4$.

При этом значения остаточного геометрического шума для крайних опорных точек соответствовали друг другу. Характер зависимостей СКО от уровня флуктуационной составляющей для значений $a = 0, 1, 2$ и 3 при СКО ГШ, равном 3, приведены на рис.4.

Рис.4. Изменение СКО остаточной смеси флуктуационного и геометрического шума для тестовых массивов от $n = 1$ до $n = 7$ для уровней флуктуаций $a = 0, 1, 2, 3$ при СКО ГШ, равном 3

Рассмотренный выше эксперимент позволяет сделать предположение о возможном появлении взаимной корреляции между составляющими шума в процессе реализации алгоритма двухточечной коррекции в случае недостаточного подавления флуктуационного шума в эталонных изображениях, используемых при «холодной» и «горячей» калибровке фотоприемника.

Компьютерное моделирование геометрического и флуктуационного шумов позволяет, в частности, при исследованиях алгоритмов коррекции раздельно оценить изменения остаточного геометрического и флуктуационного шума в выходном сигнале фотоприемника, что невозможно сделать при использовании реальных изображений.

В этом случае для раздельного анализа геометрического шума в математической модели $Y_{\text{вых}i} = KX_n + B + X_{Rn}$ достаточно задать $X_{Rn} = 0$ и тем самым заменить выражение $Y_{\text{вых}i} = Y_n + X_{Rn}$ на $Y_{\text{вых}i} = Y_n$, а для раздельного анализа действия флуктуационного шума принять значение $K = \text{const}$, $B = \text{const}$, тем самым обеспечив $Y_{\text{вых}i} = X_{Rn} + \text{const}$.

Раздельное (независимое) моделирование исходного геометрического и флуктуационного шумов показывает отсутствие между ними корреляции, что иллюстрируется графиками на рис.5.

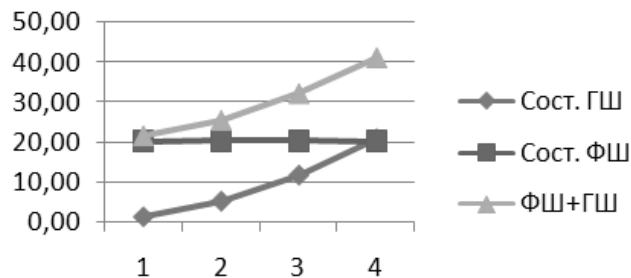


Рис.5. Поведение СКО при моделировании независимых составляющих геометрического (ГШ) и флуктуационного шума (ФШ) для тестовых массивов $n = 1, 2, 3$ и 4

Однако аналогичный раздельный анализ остаточного флуктуационного и геометрического шумов в результате двухточечной коррекции указывает на появление корреляции между флуктуационными составляющими X_{Rn} , присутствующими в формулах $X_n = (Y_{\text{вых}i} - Y_{\text{вых}1}) / K = Y_{\text{вых}i} / K - Y_{\text{вых}1} / K$, где $K = k = (Y_{\text{вых}7} - Y_{\text{вых}1}) / (m_7 - m_1)$.

В процессе исследований влияния аддитивного флуктуационного шума на результат компенсации геометрического шума фотоприемника методом двухточечной коррекции наряду с традиционным вычислением дисперсии или СКО по полю изображения дополнительно производилась оценка корреляционного момента (ковариации) между составляющими шума в случае использования массивов, содержащих смесь геометрического и флуктуационного шумов $Y_{\text{вых}i} = Y_n + X_{Rn}$. Это позволило дополнительно проанализировать характер изменения дисперсии в выходном сигнале в зависимости от уровня флуктуационного шума.

Возможная ковариация в данном случае может быть оценена как разность между результи-

рующей (остаточной) дисперсией и суммой дисперсий, полученных при независимой оценке дисперсий составляющих геометрического и флуктуационного шума. С другой стороны, при компьютерном моделировании возможна дополнительная оценка ковариации по формуле $\text{cov}(X, Y) = M(XY) - M(X)M(Y)$.

Характер изменения дисперсии (см. рис.6) в скомпенсированных кадрах обусловлен возникновением положительной корреляции между составляющими флуктуационного шума в процессе преобразований, связанных с умножением на вычисляемые с использованием этих составляющих коэффициенты компенсации, а именно $Y_{\text{вых}i}/K$ и $Y_{\text{вых}1}/K$.

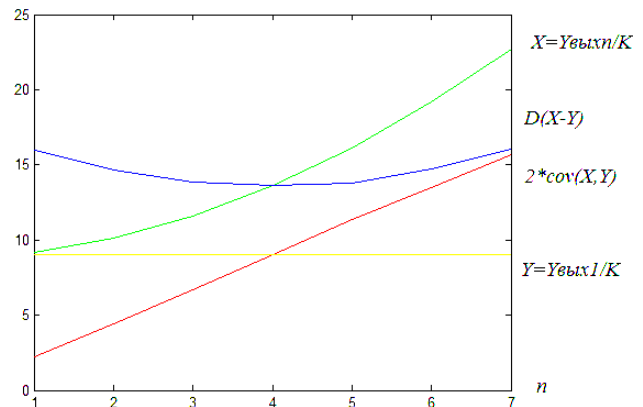


Рис.6. Характер изменения дисперсии в скомпенсированных кадрах, обусловленный положительной корреляцией между составляющими флуктуационного шума

В результате их вычитания при формировании $X_n = (Y_{\text{вых}i} - Y_{\text{вых}1})/K$ в соответствии с правилом вычисления дисперсии для зависимых случайных величин $D(X \pm Y) = D(X) + D(Y) \pm 2\text{cov}(X, Y)$ происходит уменьшение результирующей дисперсии на удвоенный корреляционный момент.

На рис.7 и 8 представлены графики изменения СКО усредненного по 256 реализациям сигнала от равномерного фона в зависимости от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника при некомпенсированном и скомпенсированном ГШ соответственно.

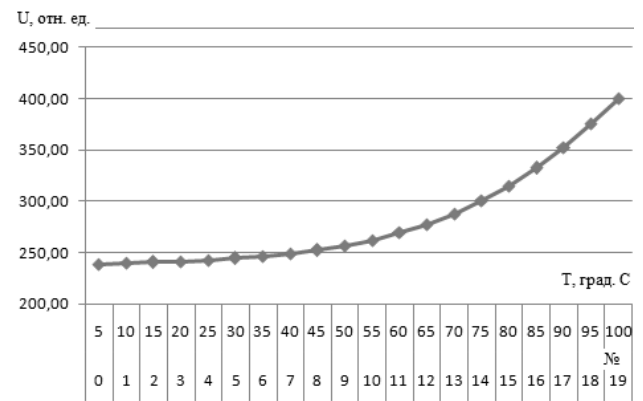


Рис.7. Значения СКО сигнала от равномерного фона в зависимости от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника (некомпенсированный ГШ)

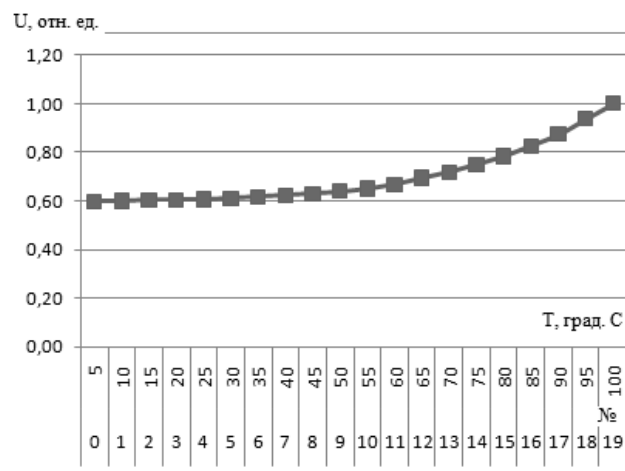


Рис. 8. Значения СКО сигнала от равномерного фона в зависимости от температуры источника излучения при фиксированной экспозиции фотоприемника (скомпенсированный ГШ)

Таким образом, для уменьшения дисперсии остаточного геометрического шума целесообразно стремиться к снижению уровня флуктуационной составляющей, в частности использовать подавление флуктуационных шумов путем усреднения кадров видеопоследовательности при формировании эталонных изображений, применяемых при «холодной» и «горячей» калибровке фотоприемника.

Выводы

1. Наличие флуктуационного шума в эталонных изображениях, используемых для вычисления коэффициентов компенсации, приводит в процессе преобразований к появлению корреляции между составляющими флуктуационного шума, присутствующими в этих изображениях.

2. Для снижения уровня остаточного геометрического шума формирование эталонных изображений необходимо проводить с подавлением флуктуационных шумов путем усреднения кадров видеопоследовательности.

1. Бычков Б.Н., Кузнецов Н.Н., Тимофеев Б.С. Цифровая коррекция датчиков ТВ-сигнала // Техника кино и телевидения. 1981. №1. С.46–52.
2. Хромов Л.И., Лебедев Н.В., Цыцулин А.К., Куликов А.Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
3. Milton A.F., Barone F.R., Kruer M.R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance // Optical Engineering. 1985. №24(5). P.855–862. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.7973588>
4. Scribner D., Kruer M., Gridley C. Physical limitations to nonuniformity correction in IR focal plane arrays // Proc. SPIE. 1987. Vol. 865. P.185–201. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.943565>
5. Chen H.-W., Fontan F., Olson T. A chopper-free measurement-based-parametric-fitting nonuniformity correction system // Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XV. Proc. SPIE. 2004. Vol.5407. P.54–65. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.541363>
6. Scribner D.A., Kruer M.R., Sarkady K., Gridley J.C. Spatial noise in staring IR focal plane arrays // Proc. SPIE. 1988. Vol.930. P.56–63. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.946627>

7. Сергунов А.А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных фотоприемников // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т.52. №8. С.38–42.
8. Борзов С.М., Козик В.И., Потатуркин О.И. Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т.52. №6. С.11–18.
9. Соляков В.Н., Кортиков М.В. Исследования долговременной стабильности параметров двухточечной коррекции формирователя сигналов изображения на базе МФПУ формата 256×256 элементов // Прикладная физика. 2010. №1. С.58–61.
10. Pezoa J.E., Torres S.N., Córdova J.P., Reeves R.A. An enhancement to the constant range method for nonuniformity correction of infrared image sequences // Proc. of 9th Iberoamerican Congress «Progress in pattern recognition, image analysis and applications». 2004. Vol.3287. P.525–532. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30463-0_66
11. Vera E. M., Torres S. N. Fast adaptive non-uniformity correction for infrared focal-plane array detectors // EURASIP. on Applied Signal Proc. 2005. Vol.13. P.1994–2004.
12. Брондз Д.С., Харитонова Е.Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-порядка // Журнал радиоэлектроники. 2008. №11. С.1–29.
13. Корнышев Н. П., Любимов М. Д., Сенин А. С. Оценка результатов коррекции геометрического шума в высокочувствительном матричном фотоприёмнике ИК-диапазона // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2017. Вып. 4. С.3–8.
14. Корнышев Н.П., Любимов М.Д., Сенин А.С. Количественная и качественная оценка геометрического шума матричных фотоприемников // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2017. №7 (105). С.23–26.
15. Корнышев Н.П., Любимов М.Д., Сенин А.С., Степанов Ю.В. Количественная оценка временной стабильности геометрического шума охлаждаемого матричного фотоприемника ИК-диапазона // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2018. №1 (107). С.69–73.
16. Корнышев Н.П., Лукин К.Г., Сенин А.С. Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника с учетом времени экспозиции // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. Вып.2. С.83–88.

References

1. Bychkov B.N., Kuznetsov N.N., Timofeev B.S. Tsifrovaya korrektsiya datchikov TV-sigнала [Digital correction of TV signal sensors]. Tekhnika kino i televideniya, 1981, no. 1, pp. 46–52.
2. Khromov L.I., Lebedev N.V., Tsitsulin A.K., Kulikov A.N. Tverdotel'noye televideniye. Televizionnyye sistemy s peremennymi parametrami na PZS i mikroprotssessorakh [Solid-state television. Television systems with variable parameters on CCD and microprocessors]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 184 p.
3. Milton A.F., Barone F.R., Kruer M.R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance. Optical Engineering, 1985, no. 24(5), pp. 855–862. doi: <https://doi.org/10.1117/12.7973588>
4. Scribner D., Kruer M., Gridley C. Physical limitations to non-uniformity correction in IR focal plane arrays. Proc. SPIE, 1987, vol. 865, pp. 185–201. doi: <https://doi.org/10.1117/12.943565>
5. Chen H.-W., Fontan F., Olson T. A chopper-free measurement-based-parametric-fitting nonuniformity correction system. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XV. Proc. SPIE, 2004, vol. 5407, pp. 54–65. doi: <https://doi.org/10.1117/12.541363>
6. Scribner D.A., Kruer M.R., Sarkady K., Gridley J.C. Spatial noise in staring IR focal plane arrays. Proc. SPIE, 1988, vol. 930, pp. 56–63. doi: <https://doi.org/10.1117/12.946627>
7. Sergunov A.A. Metody korrektsii neravnomernosti chuvstvitel'nosti infrakrasnykh fotopriyemnikov [Methods of correction of the unevenness of the sensitivity of infrared photodetectors]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy.

- Priboorostroenie — Journal of Instrument Engineering, 2009, vol. 52, no. 8, pp. 38–42.
8. Borzov S.M., Kozik V.I., Potaturkin O.I. Korrektsiya teplovizionnykh izobrazheniy na osnove statisticheskoy obrabotki real'nykh dannyykh [Correction of thermal imaging images based on statistical processing of real data]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priboorostroenie — Journal of Instrument Engineering, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 11–18.
 9. Solyakov V.N., Kortikov M.V. Issledovaniya dolgovremennoy stabil'nosti parametrov dvukhtocheynoy korrektsii formirovatel'nykh signalov izobrazheniya na baze MFPU formata 256×256 elementov [Studies of the long-term stability of the parameters of the two-point correlation of the image signal generator based on the MFPU format 256×256 elements]. Prikladnaya Fizika — Applied Physics, 2010, no. 1, pp. 58–61.
 10. Pezoa J.E., Torres S.N., Córdova J.P., Reeves R.A. An en-chance to the constant range method for nonuniformity correction of infrared image sequences. Proc. of 9th Iberoamerican Congress "Progress in pattern recognition, image analysis and applications", 2004, vol. 3287, pp. 525–532. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30463-0_66
 11. Vera E.M., Torres S.N. Fast adaptive non-uniformity correction for infrared focal-plane array detectors. EURASIPJ. on Applied Signal Proc., 2005, vol. 13, pp. 1994–2004.
 12. Brondz D.S., Kharitonova E.N. Korrektsiya geometricheskogo shuma MFPU s pomoshch'yu approksimatsii metodom naimen'shikh kvadratov peredatochnykh kharakteristik matritsy polinomom T-poryadka [Correction of geometric noise of MFPU using approximations by the method of least squares of the transfer characteristics of the matrix by a T-order polynomial]. Zhurnal Radioelektroniki — Journal of Radio Electronics, 2008, no. 11, pp. 1–29.
 13. Kornyshev N.P., Lyubimov M.D., Senin A.S. Otsenka rezul'tatov korrektsii geometricheskogo shuma v vysokochuvstvitel'nom matrichnom fotopriyomnike IK-diapazona [Evaluation of the results of geometric noise correction in a highly sensitive matrix photodetector of the IR range]. Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika teledeniya, 2017, iss. 4, pp. 3–8.
 14. Kornyshev N.P., Lyubimov M.D., Senin A.S. Kolichestvennaya i kachestvennaya otsenka geometricheskogo shuma matrichnykh fotopriyemnikov [Quantitative and qualitative assessment of geometric noise of matrix photodetectors]. Vestnik NovSU. Iss.: Technical Sciences, 2017, no. 7(105), pp. 23–26.
 15. Kornyshev N.P., Lyubimov M.D., Senin A.S., Stepanov Yu.V. Kolichestvennaya otsenka vremennoy stabil'nosti geometricheskogo shuma okhlazhdayemogo matrichnogo fotopriyemnika IK-diapazona [Quantitative assessment of the temporal stability of geometric noise of a cooled matrix photoreceiver of the IR range]. Vestnik NovSU. Iss.: Technical Sciences, 2018, no. 1(107), pp. 69–73.
 16. Kornyshev N.P., Lukin K.G., Senin A.S. Sposob kompensatsii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriyemnika s uchetom vremeni ekspozitsii [A method for compensating geometric noise of a matrix photodetector taking into account exposure time]. Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika teledeniya, 2019, iss. 2, pp. 83–88.