

Алгоритм компенсации геометрического шума изображений коротковолнового инфракрасного диапазона, формируемых фотоприемниками матричного типа

И.А. Кудинов¹, И.С. Холопов¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Гагарина 59/1, Рязань, Россия, 390005

Аннотация. Рассмотрен алгоритм компенсации геометрического шума инфракрасного сенсора, основанный на анализе видеоряда наблюдаемой камерой статической или динамической сцены. Показано, что в предположении об аддитивном характере геометрического шума межкадровое накопление такого шума по аналогии с радиолокационной задачей обнаружения сигнала на фоне коррелированной помехи позволяет успешно его компенсировать при длине видеопоследовательности свыше 500 кадров. В ходе экспериментов с камерой коротковолнового инфракрасного диапазона Xenics Bobcat 640 продемонстрировано, что в отличие от известного алгоритма компенсации геометрического шума по единственному кадру при оценивании по результатам накопления по совокупности кадров в результирующем изображении не наблюдаются характерные гало-артефакты вблизи протяженных объектов сцены.

1. Введение

Под геометрическим шумом (ГШ) принято понимать совокупность фиксированных отклонений значений выходных сигналов с различных каналов фотоприемного устройства (ФПУ) матричного типа при одинаковой интенсивности падающего на них излучения. Визуально ГШ проявляется на изображении в виде горизонтальных или вертикальных полос в зависимости от ориентации линеек фотоприемных элементов в матрице ФПУ.

В ряде практических задач (вывод на устройство отображения результата комплексирования в мультиспектральных системах технического зрения [1], безэталонная оценка информативности [2], оценка пиксельных координат центра объекта по критерию средневзвешенной яркости [3]) оценка параметров ГШ и его компенсация являются важными этапами цифровой обработки изображений.

2. Математические модели ГШ инфракрасных камер

Несмотря на то, что ГШ инфракрасных (ИК) камер в общем случае аналитически описывается нелинейной зависимостью от интенсивности падающего на ФПУ излучения [4-6], авторы [7-11] для решения задачи его компенсации применяют линейную модель:

$$I_{ij} = k_{ij}I_{0ij} + b_{ij}, \quad (1)$$

где I_{0ij} и I_{ij} – соответственно яркости пикселя на пересечении i -й строки и j -го столбца в отсутствие ГШ и при его наличии, k_{ij} и b_{ij} – соответственно мультипликативная и аддитивная составляющие ГШ.

Аддитивная составляющая ГШ b_{ij} в основном определяется неоднородностью распределения темнового тока ФПУ, поэтому зависит от температуры матрицы и времени экспозиции; мультипликативная составляющая ГШ k_{ij} связана с неоднородностью интегральной чувствительности элементов ФПУ.

В [12, 13] модель (1) упрощают до мультипликативной:

$$I_{ij} = k_{ij}I_{0ij}. \quad (2)$$

Для матричных ФПУ (МФПУ), составленных из вертикально расположенных линеек ФПУ, модель ГШ (1) может быть сведена к виду [8]:

$$I_{ij} = k_j I_{0ij} + b_j, \quad (3)$$

где k_j и b_j – соответственно мультипликативная и аддитивная составляющие ГШ в j -й линейке МФПУ.

В ряде источников [14-18] показано, что для решения задачи компенсации ГШ модель (3) может быть дополнительно упрощена до единственного параметра – постоянного смещения в j -м столбце b_j :

$$I_{ij} = I_{0ij} + b_j. \quad (4)$$

При этом коррекция аддитивного ГШ заключается просто в вычитании его оценок для каждого j -го столбца:

$$I_{0ij} = I_{ij} - b_j, \quad (5)$$

что исключает из обработки согласно (2) или (3) операцию умножения на весовой коэффициент $\{1/k_{ij}\}$ или $\{1/k_j\}$ соответственно.

Задача компенсации ГШ предполагает оценку параметров математических моделей (1)–(4).

Для разработки алгоритма компенсации ГШ примем гипотезу о том, что его математическая модель описывается выражением (4).

3. Методы оценивания и компенсации ГШ

Методы компенсации ГШ (в англоязычной литературе – *Non-Uniformity Correction, NUC*) принято разделять на два семейства [18, 19]: методы, основанные на предварительной калибровке по тест-объекту (*Calibration-Based NUC, CBNUC*) и методы, основанные непосредственно на анализе наблюдаемой сцены (*Scene-Based NUC, SBNUC*). К первой относят методы одно-, двух- и многоточечной калибровки [20]. Классическим представителем *CBNUC* алгоритмов для компенсации неоднородности характеристик элементов МФПУ является метод двухточечной калибровки (так называемая процедура *Two Point NUC, TPNUC*), предполагающий калибровку камеры по двум кадрам с равномерной яркостью (равномерность яркости в поле кадра может достигаться в том числе и принудительной расфокусировкой за счет введения в тракт оптической системы расфокусирующего элемента, формирующего на входе МФПУ равномерный поток излучения [21]):

- для камер средневолнового (3..5 мкм) и длинноволнового (8..14 мкм) ИК диапазонов – по двум изображениям абсолютно черного тела с различными температурами (в двух температурных точках, условно принимаемых за «холодную» и «горячую»);
- для камер коротковолнового (0,9..1,7 мкм) ИК диапазона – по двум изображениям сцены с равномерной освещенностью при двух различных выдержках (как правило, 0,5 и 5 мс).

Для моделей (1) и (3) это позволяет найти оценки параметров k_{ij} и b_{ij} из решения систем пар соответствующих линейных уравнений. В то же время применение *CBNUC* методов для неохлаждаемых ИК камер средневолнового и длинноволнового диапазонов не позволяет выполнять эффективную компенсацию ГШ ввиду ввиду чувствительности параметров k_{ij} и b_{ij} к изменению температуры камеры.

Указанного недостатка лишены методы семейства *SBNUC*, оперирующие только статистиками распределения яркости наблюдаемой сцены и не требующие специализированного стендового оборудования для калибровки. Их недостатком, в свою очередь, являются артефакты компенсации ГШ, проявляющиеся на границах изображений протяженных объектов [16-19].

4. Методы компенсации ГШ, основанные на анализе наблюдаемой сцены

При принятии гипотез о том, что модель ГШ описывается выражением (4), а МФПУ состоит из столбцов фоточувствительных линеек, эффективным *SBNUC* алгоритмом компенсации ГШ является алгоритм оценивания статистических характеристик изменения яркости вдоль строки изображения, подробно рассмотренный в работе [17]. Алгоритм содержит следующие основные шаги:

1) построчная обработка исходного изображения 1D сглаживающим фильтром, в качестве которого выступает управляемый (guided) фильтр с параметром регуляризации $\varepsilon = 0,4^2$ (высокая степень сглаживания и подавления шума); управляемый фильтр обладает всеми преимуществами билатерального фильтра и при этом лишен его недостатков [22, 23];

2) оценивание пространственной высокочастотной (ВЧ) составляющей исходного изображения по горизонтали:

$$\mathbf{I}_{\text{ВЧ_гор}} = \mathbf{I} - \mathbf{I}_{\text{НЧ}},$$

где \mathbf{I} – исходное изображение, $\mathbf{I}_{\text{НЧ}}$ – результат фильтрации гауссовым низкочастотным (НЧ) фильтром;

3) разделение высокочастотной составляющей $\mathbf{I}_{\text{ВЧ_гор}}$ на ГШ \mathbf{I}_b и высокочастотную сигнальную составляющую $\mathbf{I}_{\text{ВЧ}}$:

$$\mathbf{I}_{\text{ВЧ_гор}} = \mathbf{I}_{\text{ВЧ}} + \mathbf{b};$$

такое разделение выполняется на основе вычисления статистики HDS_{1D} (1D Horizontal Differential Statistics [17]) в каждой i -й строке изображения для каждого j -го столбца:

$$HDS_{1D}(j) = \left[\frac{1}{K_1(j)} \sum_{k=-N_{\text{гор}}/2}^{N_{\text{гор}}/2} \exp \left(- \frac{\|I_{\text{ВЧ } j} - I_{\text{ВЧ } j+k}\|^2}{2\sigma_{r1}^2} \right) \partial I_{j+k} \right], \quad (6)$$

где $K_1(j) = \sum_{k=-N_{\text{гор}}/2}^{N_{\text{гор}}/2} \exp \left(- \frac{\|I_{\text{ВЧ } j} - I_{\text{ВЧ } j+k}\|^2}{2\sigma_{r1}^2} \right)$ – нормирующий множитель, ∂I_{j+k} – градиент яркости

вдоль строки горизонтали в $(j+k)$ -м столбце, $N_{\text{гор}}$ – размер горизонтального скользящего 1D окна (в [17] $N_w = 9$), σ_{r1} – параметр, определяющий удельный вес модуля разности яркостей j -м и $(j+k)$ -м столбцах: в [17] σ_{r1} выбирается в 10 раз большим, чем среднеквадратическое отклонение (СКО) градиента яркости ∂I по строке в соответствии с рекомендациями [24];

4) оценивание ГШ для каждого j -го столбца на основе вычисления статистики

$$b_j = \frac{1}{K_2(j)} \sum_{k=-N_{\text{верт}}/2}^{N_{\text{верт}}/2} \exp \left(- \frac{\gamma}{HDS_{1D}(j) + \chi} \cdot \frac{k^2}{2\sigma_{s2}^2} \right) I_{\text{ВЧ } j+k}, \quad (7)$$

где $K_2(j) = \sum_{k=-N_{\text{верт}}/2}^{N_{\text{верт}}/2} \exp \left(- \frac{\gamma}{HDS_{1D}(j) + \chi} \cdot \frac{k^2}{2\sigma_{s2}^2} \right)$ – нормирующий множитель, χ – малое

положительное число для предотвращения деления на ноль при $HDS_{1D}(j) = 0$, а параметры γ , σ_{s2} и размер скользящего окна по вертикали $N_{\text{верт}}$ в [17] приняты равными 0,5, 0,8 H и H соответственно, где H – высота кадра в пикселях.

Выбор высоты окна $N_{\text{верт}}$ выполняется из компромиссных соображений: при малых $N_{\text{верт}}$ ГШ подавляется лучше (особенно на изображениях с равномерным фоном), однако его оценка в таком случае чувствительна к ВЧ пространственной составляющей яркости. Напротив, при больших $N_{\text{верт}}$ статистика (7) менее чувствительна к сюжетным особенностям сцены, но и погрешность оценки ГШ при этом оказывается выше. Это иллюстрирует рисунок 1, на котором показано, что наличие протяженных вертикальных объектов приводит к появлению артефактов компенсации ГШ на изображении видеоканера коротковолнового ИК (*short wave infrared, SWIR*) диапазона – высветленным областям над антенными вышками и трубами здания. При этом на участках с однородным фоном ГШ эффективно подавляется.

Идея алгоритма, разработанного авторами, заключается в том, что опираясь на принципы оценивания ГШ [17] за счет накопления серии кадров возможно сформировать изображение с приблизительно равномерным фоном, что повысит эффективность компенсации.



Рисунок 1. Кадры с видеокамеры Xenics Bobcat 640 в режиме с выключенной компенсацией ГШ и битых пикселей: слева – исходное изображение, справа – после компенсации ГШ по [17].

5. Алгоритм компенсации ГШ по серии кадров

Идея алгоритма основана на принятии гипотезы (4) об аддитивном характере ГШ и принципе квазиоптимального обнаружения импульсно-пачечных сигналов на фоне коррелированных помех в радиолокации: режекции низкочастотной помехи и накоплении высокочастотного сигнала [25-27]. При этом полезным, подлежащим обнаружению сигналом, будем считать ГШ, а коррелированной помехой – изображение сюжета в кадре.

Основные этапы алгоритма компенсации ГШ по серии кадров следующие.

- 1) Получают кадр с видеокамеры ИК диапазона в текущий момент времени k .
- 2) Выполняют его рекуррентное усреднение с ранее полученными от МФПУ кадрами:
 - в полученном в k -й момент времени кадре \mathbf{I}^k случайным образом переставляют все его строки и получают кадр \mathbf{I}^{*k} ; в результате перестановки строк пиксели j -го столбца кадра \mathbf{I}^k , соответствующие одной линейке фоточувствительных элементов МФПУ с вертикальным направлением считывания зарядовых пакетов, в кадре \mathbf{I}^{*k} по-прежнему остаются в j -м столбце;
 - по рекуррентному правилу оценивают вспомогательный кадр \mathbf{N}^k :

$$\mathbf{N}_k = [(\mathbf{n} - 1)\mathbf{N}^{k-1} + \mathbf{I}^{*k}]/n, \quad (8)$$

где n – количество ранее принятых кадров;

- 3) По кадру \mathbf{N}_k оценивают дисперсию градиента яркости D_k^h при движении по строке (в горизонтальном направлении):

$$D_k^h = M_{i,j} \{(N_{ij} - N_{i,j-1})^2\},$$

где $M\{\cdot\}$ обозначает вычисление математического ожидания яркости по полю изображения; фоновая составляющая (коррелированная помеха) при этом подавляется по аналогии с принципом работы радиолокационного фильтра череспериодной компенсации [27].

При формировании \mathbf{N}_k с равномерной яркостью фона оценка дисперсии D_k^h будет максимальной и равна мощности ГШ сенсора.

- 4) Если при получении нового кадра k оценка дисперсии D_k^h больше, чем ее предыдущее максимальное значение D_{\max}^h , это означает, что отношение «ГШ – ВЧ часть фона» во вспомогательном кадре выросло. Поэтому выполняется запись \mathbf{N}_k в калибровочный кадр \mathbf{K} и обновляется значение D_{\max}^h :

$$\mathbf{K} = \mathbf{N}_k, \quad D_{\max}^h = D_k^h.$$

- 5) Оцененный калибровочный кадр \mathbf{K} разделяется на две аддитивных составляющих: низкочастотную $\mathbf{K}_{\text{нч}}$ (фон) и высокочастотную \mathbf{b} (ГШ):

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\text{нч}} + \mathbf{b}, \quad (9)$$

- 6) Выполняется компенсация геометрического шума согласно (5) с последующим линейным контрастированием кадра \mathbf{X}_k .

Случайная перестановка строк при формировании \mathbf{I}^{*k} с последующим усреднением таких кадров обеспечивает выравнивание яркости фона по полю кадра \mathbf{N}_k даже при наличии в сцене областей различной яркости (например, для съемки вне помещений – областей неба и

подстилающей поверхности), что устраняет характерные для *SBNUC* алгоритмов артефакты компенсации ГШ. При большом количестве усредняемых кадров со случайным образом переставленными строками в силу центральной предельной теоремы справедливо полагать, что распределение яркости фона будет стремиться к нормальному, поэтому накопление по (8) применительно к ГШ на фоне сюжета сцены эквивалентно задаче некогерентного накопления полезного сигнала на фоне гауссовского шума в радиолокации [25, 26].

Схема алгоритма компенсации ГШ приведена на рисунке 2.

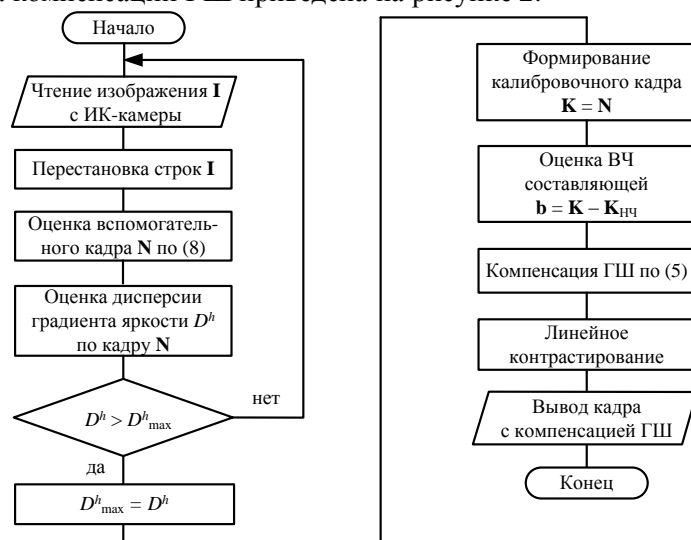


Рисунок 2. Схема алгоритма компенсации ГШ.

6. Результаты экспериментов

Эксперименты проводились с камерой SWIR диапазона Xenics Bobcat 640 [28]. Для уменьшения объема вычислений при разделении калибровочного кадра K на НЧ и ВЧ компоненты согласно (9) авторы применяли процедуру быстрой НЧ фильтрации, описанную в [29], с ВОХ-фильтром апертурой в 32 элемента.

На рисунках 3-5 показаны соответственно выборочные кадры (с интервалом времени между ними в 1,25 с) из исходного видеосюжета длительностью 15 с и частотой кадров 50 Гц, результаты рекуррентного оценивания ГШ согласно разработанному алгоритму и результаты компенсации ГШ.



Рисунок 3. Кадры видеопоследовательности, записанной видеокамерой Xenics Bobcat 640.

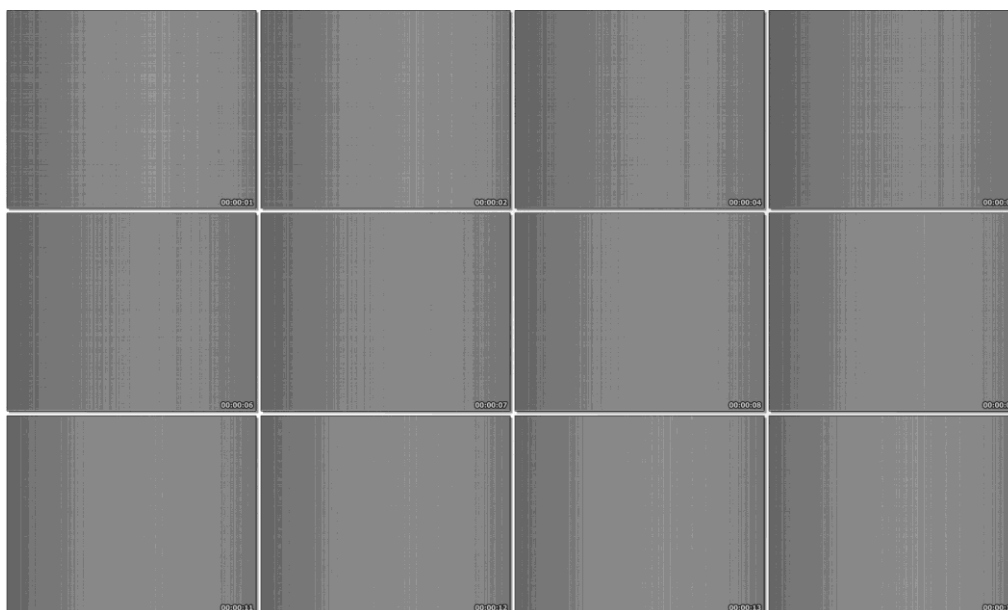


Рисунок 4. Результаты рекуррентного оценивания ГШ Xenics Bobcat 640 (с аддитивным фоном интенсивностью 128 единиц).

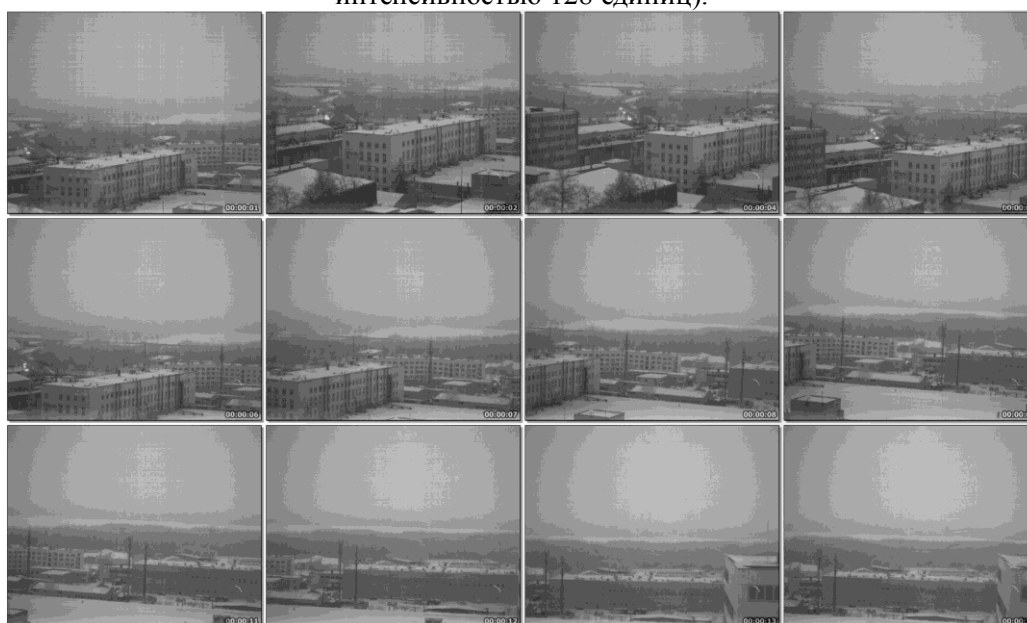


Рисунок 5. Результаты компенсации ГШ Xenics Bobcat 640.

Из результатов эксперимента следует, что приблизительно после 500 кадров обеспечивается асимптотическая сходимость оценки ГШ согласно (8) и (9) к истинному значению; при этом результат компенсации ГШ не содержит гало-артефактов, характерных для *SBNUC* алгоритмов [15-18].

Также авторами был проведен эксперимент с видеокамерой длинноволнового (*long wave infrared, LWIR*) ИК диапазона на основе неохлаждаемого микроболометра Xenics Gobi 384 [30] в режиме с выключенной компенсацией ГШ и битых пикселей, в котором сравнивались результаты оценивания ГШ, полученные при закрытом расфокусированном объективе камеры согласно *CBNUC* методике [21] (рисунки 6-8) и согласно разработанному алгоритму (рисунок 9).

При визуальном сходстве кадров с ГШ на рисунках 8 и 9, различие в их СКО приблизительно в 1,5 раза объясняется, в первую очередь, распространением (при перестановке строк) неравномерности коэффициента усиления матрицы камеры согласно модели (1) по всей

высоте столбца кадра (темные края на рисунке 9). Поэтому, несмотря на формирование субъективно комфортного изображения (без выраженного ГШ), рассмотренный алгоритм компенсации ГШ не только не позволяет скомпенсировать неравномерность коэффициента передачи яркости, но и может даже усилить его, что будет проявляться на изображениях с протяженными объектами однородной текстуры с равномерной яркостью.

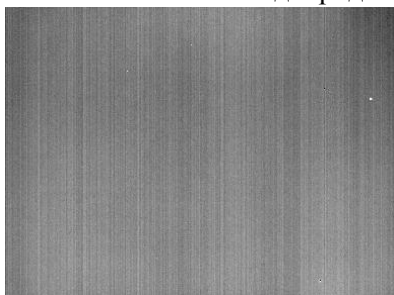


Рисунок 6. Исходный кадр.



Рисунок 7. Неравномерность усиления.

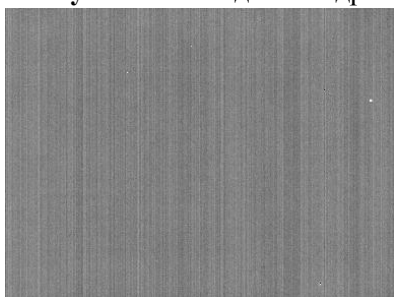


Рисунок 8. Рисунок 6 с компенсацией неравномерности усиления, СКО = 9,25.

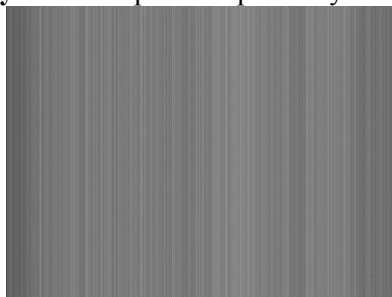


Рисунок 9. Результат оценки ГШ согласно алгоритму авторов, СКО = 14,12.

7. Заключение

Таким образом, рекуррентное оценивание ГШ по кадрам видеопоследовательности является альтернативой известным методам *SBNUC*. К его преимуществам по сравнению с методами, основанными на вычислении *HDS* статистик, следует отнести применение только математических операций сложения и умножения при программной реализации алгоритма компенсации ГШ, а также отсутствие артефактов компенсации, проявляющихся в виде эффекта гало, а к недостаткам – отсутствие компенсации неравномерности коэффициента усиления матрицы камеры, достижимого в известных алгоритмах калибровки по тест-объекту (*CBNUC*).

8. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00419 А.

9. Литература

- [1] Костяшкин, Л.Н. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров – М.: Физматлит, 2016. – 234 с.
- [2] Старовойтов, В.В. Сравнительный анализ безэталонных мер оценки качества цифровых изображений / В.В. Старовойтов, Ф.В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 1. – С. 24-32. DOI: 10.21122/2309-4923-2017-1-24-32.
- [3] Hintze, G.C. AVGS, AR&D for Satellites, ISS, the Moon, Mars and Beyond / G.C. Hintze, K.G. Cornett, M.H. Rahmatipour, A. Heaton, L. Newman, K. Fleischmann, B. Hamby // Guidance, Navigation and Control Conference: proc. of the AIAA – Rohnert Park, 2007. – P. 1-12. DOI: 10.2514/6.2007-2883.
- [4] Borovytsky, V.N. Residual error after non-uniformity correction / V.N. Borovytsky // Semiconductor Physics, quantum electronics & optoelectronics. – 2000. – Vol. 3(1). – P. 102-105.

- [5] Харитоновна, Е.Н. Математическая модель выходного сигнала и геометрического шума матричных фотоприемных устройств, учитывающая нелинейность характеристики чувствительности пикселей / Е.Н. Харитоновна // Вестник Поморского университета. Серия: естественные науки. – 2010. – № 1. – С. 117-122.
- [6] Брондз, Д.С. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом T -го порядка / Д.С. Брондз, Е.Н. Харитоновна // Журнал радиоэлектроники. – 2008. – № 11. – С. 1-29.
- [7] Тарасов, В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков – М.: Логос, 2004. – 452 с.
- [8] Perry, D.L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors / D.L. Perry, E.L. Dereniak // Optical engineering. – 1993. – Vol. 32. – P. 1854-1859. DOI: 10.1117/12.145601.
- [9] Ratliff, B.M. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays / B.M. Ratliff, M.M. Hayat // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – Vol. 19(9). – P. 1737-1747. DOI: 10.1364/JOSAA.19.001737.
- [10] Narendra, P. Reference-free nonuniformity compensation for IR imaging arrays / P. Narendra // Proc. SPIE. – 1980. – Vol. 252. – P. 10-17. DOI: 10.1117/12.959478.
- [11] Sheng, M. Calibration-based NUC method in real-time based on IRFPA / M. Sheng, J. Xie, Z. Fu // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 22. – P. 372-380. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.058.
- [12] Бехтин, Ю.С. Вейвлет-обработка ИК-изображений для компенсации дрейфа вольтовой чувствительности элементов фотоэлектронных модулей / Ю.С. Бехтин, Д.В. Титов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 10-15.
- [13] Бехтин, Ю.С. Алгоритмы цифровой обработки ИК-изображений без калибровки по геометрическому шуму / Ю.С. Бехтин, А.А. Баранцев, А.А. Брянцев, Л.Д. Сагинов, В.Н. Соляков, А.С. Медведев // Прикладная физика. – 2008. – № 1. – С. 110-113.
- [14] Hardie, R. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration / R. Hardie, M. Hayat, E. Armstrong, B. Yasuda // Appl. Opt. – 2000. – Vol. 39(8). – P. 1241-1250. DOI: 10.1364/AO.39.001241.
- [15] Zuo, C. Improved interframe registration based nonuniformity correction for focal plane arrays / C. Zuo, Q. Chen, G. Gu, X. Sui, J. Ren // Infrared Phys. Technol. – 2012. – Vol. 55(4). – P. 263-269. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.04.002.
- [16] Cao, Y. Effective strip noise removal for low-textured infrared images based on 1-D guided filtering / Y. Cao, M.Y. Yang, C.-L. Tisse // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. – 2016. – Vol. 26. – P. 2176-2188. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2493443.
- [17] Cao, Y. Spatially adaptive column fixed-pattern noise correction in infrared imaging system using 1D horizontal differential statistics / Y. Cao, Z. He, J. Yang, M.Y. Yang // IEEE Photonics Journal. – 2017. – Vol. 9(5). – P. 1-13. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2752000.
- [18] Liu, C. FPN estimation based nonuniformity correction for infrared imaging system / C. Liu, X. Sui, Y. Liu, X. Kuang, G. Gu, Q. Chen // Infrared Physics and Technology. – 2019. – Vol. 96. – P. 22-29. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.09.025.
- [19] Huo, L. Staircase-scene-based nonuniformity correction in aerial point target detection systems / L. Huo, D. Zhou, D. Wang, R. Liu, B. He // Appl. Opt. – 2016. – Vol. 55. – P. 7149-7156. DOI: 10.1364/AO.55.007149.
- [20] Liang, K. Nonuniformity correction based on focal plane array temperature in uncooled long-wave infrared cameras without a shutter / K. Liang, C. Yang, L. Peng, B. Zhou // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. 884-889. DOI: 10.1364/AO.56.000884.
- [21] Кремис, И.И. Патент RU 2449491. МПК: H04N 5/33 (2006.01), G02B 23/12 (2006.01). Способ компенсации неоднородности сигнала фоточувствительных элементов многоэлементного фотоприемника. Заявл.: 18.10.2010. Опубл.: 27.04.2012. Бюл. № 12.
- [22] He, K. Guided image filtering / K. He, J. Sun, X. Tang // IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence. – 2013. – Vol. 35(6). – P. 1397-1409. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213.

- [23] Гаврилов, Д.А. Аппаратная реализация сжатия динамического диапазона цифровых изображений на ПЛИС Xilinx / Д.А. Гаврилов, А.В. Павлов, Д.Н. Щелкунов // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 10. – С. 1-21. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.6.
- [24] Buades, A. A non-local algorithm for image denoising / A. Buades, B. Coll, J.-M. Morel // IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. – 2005. – Vol. 2. – P. 60-65. DOI: 10.1109/CVPR.2005.38.
- [25] Кузьмин, С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
- [26] Бакулев, П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев – М: Радиотехника, 2015. – 440 с.
- [27] Бакулев, П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, В.М. Степин – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
- [28] Bobcat 640 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.xenics.com/products/bobcat-640-series/> (22.11.2019).
- [29] Jarosz, W. Fast image convolutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elynxsdk.free.fr/ext-docs/Blur/Fast_box_blur.pdf (17.05.2017).
- [30] Smart and affordable Xenics Gobi-384: uncooled microbolometer camera for thermal imaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.xenics.com/press-release/smart-and-affordable-xenics-gobi-384/> (20.02.2020).

Scene-based non-uniformity fixed pattern noise correction algorithm for infrared video sequences

I.A. Kudinov¹, I.S. Kholopov¹

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Gagarina street 59/1, Ryazan, Russia, 390005

Abstract. An algorithm for a fixed pattern noise correction for infrared sensors based on the analysis of the video sequence of a static or dynamic scene observed by the camera is considered. It is shown that on the assumption of the additive nature of the fixed pattern noise, the frame-to-frame accumulation of such noise by analogy with the radar problem of detecting a signal against a correlated clutter can successfully compensate for it with a video sequence of more than 500 frames. During experiments with the Xenics Bobcat 640 short-wave infrared camera it was demonstrated that in contrast to the well-known non-uniformity correction algorithm for a single frame, typical for it halo artifacts near extended scene objects are not observed in the resulting image, when fixed pattern noise is estimated from the results of accumulation over a set of frames.