

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932.2

МЕЖКАДРОВАЯ ОБРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ СКАНИРУЮЩИМ ФПУ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕРАВНОМЕРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

© Г. И. Громилин, В. П. Косых

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kosych@iae.nsk.su*

Для улучшения эксплуатационных характеристик многоэлементных фотоприёмников, обладающих пространственно-неравномерной чувствительностью, применяется выравнивание чувствительности, основанное на их калибровке, которая в процессе эксплуатации время от времени должна повторяться из-за временного дрейфа параметров приёмника. Особый интерес специалистов привлекают методы калибровки и коррекции, не требующие применения источников эталонного освещения фотоприёмника. Предлагаемый метод оценки и коррекции неравномерной чувствительности сканирующего фотоприёмного устройства ориентирован на ослабление влияния этой помехи при межкадровой обработке и основан на анализе пары изображений, формируемых в процессе взаимного смещения фотоприёмного устройства и регистрируемой сцены. При известном смещении изображений по столбцам, находящимся в зоне перекрытия изображений, строится недоопределённая система уравнений, для решения которой применяется метод наименьших квадратов. Приводится способ коррекции ошибки решения, обусловленной недоопределённостью системы. Численным экспериментом подтверждена эффективность метода в применении к межкадровому подавлению фона и обнаружению подвижных малоразмерных объектов.

Ключевые слова: обнаружение малоразмерных объектов, межкадровое подавление фона, сканирующее ФПУ, коррекция пространственно-неравномерной чувствительности.

DOI: 10.15372/AUT20210301

Введение. Актуальной задачей для космических систем глобального мониторинга околоземного пространства является обнаружение в изображениях с мощным медленно изменяющимся во времени пространственно-нестационарным фоном малоразмерных слабоконтрастных объектов, движущихся относительно фона. Подход, основанный на межкадровом подавлении фона в последовательности изображений [1, 2], может обеспечить значительно более высокую надёжность обнаружения подвижных объектов, чем внутрикадровая обработка, базирующаяся на априорном знании или оценивании статистических моделей фона. Предварительные этапы межкадровой обработки заключаются в оценивании взаимного сдвига кадров, их совмещении и построении межкадровой разности. Эффективность этого подхода снижается присутствием структурной помехи (иногда её называют геометрическим шумом [3]), обусловленной пространственной неравномерностью фотоэлектрических характеристик многоэлементного приёмника изображений (матрицы или линейки фоточувствительных элементов). Сохранить высокую надёжность обнаружения позволяет коррекция помехи, основанная на предварительной калибровке фотоприёмника.

Наиболее распространённой моделью структурной помехи является линейная модель, в которой дискретный сигнал, формируемый фотоприёмным устройством (ФПУ), представляется в виде

$$S_{ij} = B_{ij}k_{ij} + c_{ij},$$

где B_{ij} — интенсивность излучения, проецируемого оптической системой ФПУ в плоскость фотоприёмника; k_{ij} и c_{ij} — чувствительность и темновой сигнал i, j -го элемента фотоприёмника (компоненты структурной помехи); $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, I, J — количество строк и столбцов в фотоприёмнике. Оценивание компонент структурной помехи в этой модели выполняется посредством двухточечной калибровки [3], причём если для оценки темнового сигнала достаточно перекрыть излучение на входе, то для оценки чувствительности необходимо сформировать входное излучение с известным пространственным распределением в плоскости фотоприёмника, что влечёт за собой усложнение регистрирующей аппаратуры. В связи с этим постоянно ведётся поиск безэталонных способов калибровки и коррекции непосредственно по регистрируемым данным.

Одним из способов является формирование равномерного распределения излучения за счёт усреднения изображений движущейся сцены [4]. Здесь качество калибровки зависит от степени однородности освещения всех элементов фотоприёмника в процессе усреднения. Другой подход основан на накоплении большого количества искажённых помехой кадров с коррекцией взаимных смещений [5]. В [6] предлагается более строгий алгоритм безэталонной калибровки и коррекции, использующий метод наименьших квадратов (МНК) и позволяющий по мере накопления кадров с известными взаимными смещениями улучшать оценки k_{ij} и c_{ij} . Альтернативные подходы опираются на предположение, что структурная помеха имеет более высокочастотный пространственный спектр, чем полезный сигнал [3, 7].

В данном исследовании рассматривается не требующий эталонного источника способ калибровки и коррекции чувствительности сканирующего ФПУ, основанный на анализе всего двух взаимно смещённых кадров, при условии, что неравномерность темнового сигнала предварительно скомпенсирована. Прежде чем перейти к описанию способа калибровки, рассмотрим условия, при которых присутствие структурной помехи позволяет оценить взаимное смещение фоновой составляющей кадров.

Оценивание межкадрового сдвига в присутствии мультипликативной структурной помехи. Пусть два изображения, проецируемые оптической системой смотрящего ФПУ в плоскость матричного фотоприёмника, отличаются только пространственным сдвигом. Тогда кадры, зарегистрированные ФПУ, можно представить в виде

$$S_{ij}^{(1)} = b_{ij}k_{ij} + \xi_{ij}^{(1)}, \quad S_{ij}^{(2)} = b_{i+s, j+t}k_{ij} + \xi_{ij}^{(2)},$$

где b_{ij} и $b_{i+s, j+t}$ — интенсивности излучения, проецируемого в плоскость фотоприёмника в первом и втором кадрах; k_{ij} — чувствительность i, j -го элемента приёмника; $\xi_{ij}^{(1)}$ и $\xi_{ij}^{(2)}$ — шумы i, j -го элемента в первом и втором кадрах. Полагая b , k и ξ независимыми случайными процессами, можно показать, что при отсутствии корреляции между реализациями шума в разных кадрах межкадровая кросскорреляционная функция может быть представлена в виде

$$R_{Smn} = E\{S_{ij}^{(1)}S_{i+m, j+n}^{(2)}\} = \bar{b}^2\bar{k}^2 + \bar{k}^2\sigma_b^2R_{bm+s, n+t} + \bar{b}^2\sigma_k^2R_{kmn} + \sigma_b^2\sigma_k^2R_{bm+s, n+t}R_{kmn},$$

где \bar{b} и \bar{k} — средние значения; σ_b^2 и σ_k^2 — дисперсии; R_b и R_k — нормированные автокорреляционные функции процессов b и k соответственно. Если структурная помеха k пространственно не коррелирована, то

$$R_{kmn} = \delta_{mn}$$

(здесь δ_{mn} — символ Кронекера) и

$$R_{S mn} = \bar{b}^2 \bar{k}^2 + \bar{k}^2 \sigma_b^2 R_{b m+s, n+t} + \bar{b}^2 \sigma_k^2 \delta_{mn} + \sigma_b^2 \sigma_k^2 R_{b m+s, n+t} \delta_{mn}.$$

В этом случае функция $R_{S mn}$ везде, кроме точки $(m, n) = (0, 0)$, удовлетворяет условию

$$R_{S mn} \leq \bar{b}^2 \bar{k}^2 + \bar{k}^2 \sigma_b^2 R_{b 0, 0}, \quad (1)$$

т. е. её максимум лежит в точке $-(s, t)$, что позволяет найти величину межкадрового сдвига. Для пространственно-коррелированной структурной помехи достаточно точно установить межкадровый сдвиг можно, если он значительно превышает интервалы корреляции фона и помехи.

Несколько иначе выглядит определение сдвига кадров, формируемых сканирующим ФПУ, в котором развёртка изображения вдоль одной из координат осуществляется за счёт движения линейки фотоприёмников относительно наблюдаемой сцены. Здесь чувствительность вдоль направления сканирования не изменяется, поэтому автокорреляционная функция R_k не зависит от координаты вдоль этого направления и межкадровая кросскорреляционная функция принимает вид (для определённости полагаем, что сканирование ведётся вдоль координаты, соответствующей второму индексу)

$$R_{S mn} = \bar{B}^2 \bar{k}^2 + \bar{k}^2 \sigma_b^2 R_{b m+s, n+t} + \bar{b}^2 \sigma_k^2 R_{k m} + \sigma_b^2 \sigma_k^2 R_{b m+s, n+t} R_{k m}.$$

Условие (1) теперь может не выполняться не только в точке $(m, n) = (0, 0)$. Влияние R_k можно устранить, используя её чётность. Поскольку $R_{k m} = R_{k -m}$, то

$$\check{R}_{S mn} = R_{S mn} - R_{S -m, -n} = \sigma_b^2 (\bar{k}^2 - \sigma_k^2 R_{k m}) (R_{b m+s, n+t} - R_{b -m+s, -n+t}),$$

и если межкадровый сдвиг превышает интервал корреляции фона, а $\sigma_k^2 \ll \bar{k}^2$ (что обычно выполняется), то максимум $\check{R}_{S mn}$ лежит близко к точке $-(s, t)$. Таким образом, определение межкадрового сдвига не составляет труда за исключением случая, когда сдвиг присутствует только вдоль направления сканирования.

Оценивание чувствительности элементов фотоприёмника и формирование разностного кадра. Представим кадры последовательностей в виде матриц $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_j]$, где \mathbf{s}_j — вектор-столбец длиной I элементов, соответствующий j -му столбцу кадра. Предположим, что сканирование выполняется вдоль строк кадров, формируемых ФПУ, и два кадра последовательности, как указано выше, различаются только сдвигом (s, t) и шумовой составляющей. Чтобы воспользоваться при описании формирования кадра векторно-матричными операциями, представим столбец \mathbf{s}_j зарегистрированного в кадре сигнала диагональной матрицей $\mathbf{D}_j = \text{diag}(\mathbf{s}_j)$, интенсивность излучения, падающего на элементы приёмника в этом столбце, — вектором-столбцом \mathbf{b}_j , а чувствительность элементов ФПУ — вектором-столбцом \mathbf{k} . Тогда с точностью до шума фотоприёмника они удовлетворяют соотношению

$$\mathbf{b}_j = \mathbf{D}_j \boldsymbol{\nu}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\nu}$ — вектор-столбец, компонентами которого являются величины, обратные компонентам вектора $\mathbf{k} = (k_1, \dots, k_i, \dots, k_I)^\top$.

Пренебрегая краевым эффектом, связанным с отсутствием части строк первого кадра во втором кадре, и различиями, обусловленными появлением или исчезновением в кадрах малоразмерных объектов, интенсивность излучения в j -м столбце второго кадра выразим

через циклически сдвинутую интенсивность излучения в соответствующем ему $(j + t)$ -м столбце первого кадра:

$$\mathbf{b}_j^{(2)} = \mathbf{P}_s \mathbf{b}_{j+t}^{(1)}, \quad (3)$$

где \mathbf{P}_s — матрица, реализующая циклический сдвиг вектора на s элементов. Из (2) и (3) следует, что вектор $\boldsymbol{\nu}$ должен удовлетворять системе линейных однородных уравнений

$$(\mathbf{D}_{j+t}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}_j^{(1)}) \boldsymbol{\nu} = 0. \quad (4)$$

При получении (4) не учтён шум, присутствующий в зарегистрированных сигналах \mathbf{S} , поэтому для оценки $\boldsymbol{\nu}$ вместо решения системы (4) применим МНК, потребовав, чтобы оценка минимизировала целевую функцию

$$f(\boldsymbol{\nu}) = \boldsymbol{\nu}^\top (\mathbf{D}_{j+t}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}_j^{(1)})^\top (\mathbf{D}_{j+t}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}_j^{(1)}) \boldsymbol{\nu}. \quad (5)$$

Это условие выполняется, если $\boldsymbol{\nu}$ — собственный вектор матрицы $(\mathbf{D}_{j+t}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}_j^{(1)})^\top (\mathbf{D}_{j+t}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}_j^{(1)})$, соответствующий её минимальному собственному числу. Поскольку для сканирующего ФПУ вектор $\boldsymbol{\nu}$ должен быть одинаковым во всех столбцах кадра, окончательная оценка получается его нормализацией и усреднением по всем соответствующим столбцам, присутствующим в первом и втором кадрах.

Вычисление межкадровой разности. Учёт полученной оценки при формировании разностного кадра позволяет многократно снизить остаточный фон, практически не ухудшая изображений объектов. Разностный кадр после компенсации сдвига по обеим координатам можно представить как

$$\mathbf{U} = \mathbf{D}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}^{(1)} \mathbf{P}_t, \quad (6)$$

а разность с коррекцией чувствительности — как

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}(\mathbf{D}^{(2)} - \mathbf{P}_s \mathbf{D}^{(1)} \mathbf{P}_t), \quad (7)$$

где $\mathbf{K} = \text{diag}(\boldsymbol{\nu})$.

Следует отметить один недостаток предлагаемого метода. Если применить коррекцию к каждому из входных кадров, можно обнаружить, что исходная помеха на них практически исчезает, зато появляется другая, периодическая, с периодом, зависящим от взаимного сдвига кадров поперёк направления сканирования (далее — поперечного сдвига). Эта помеха возникает, по-видимому, из-за подмены в выражении (2) неизвестных значений компонент векторов $\mathbf{b}_j^{(2)}$ циклически сдвинутыми известными из $\mathbf{b}_{j+e}^{(1)}$. Поскольку при вычислении межкадровой разности согласно (7) помеха синхронно действует на оба кадра, в разностном кадре она практически компенсируется. К сожалению, эффект компенсации этой помехи проявляется только на разности кадров с поперечным сдвигом той же величины, что и у кадров, участвовавших в калибровке, что не позволяет использовать оценку $\boldsymbol{\nu}$ для коррекции разности кадров, сдвинутых иначе. Однако зависимость периода помехи от величины взаимного смещения калибровочных кадров даёт возможность в значительной мере её ослабить. Как показал эксперимент, спектр помехи сосредоточен в окрестностях гармоник с номером $[I/t]$ (целая часть отношения $[I/t]$) и кратных ей в разложении Фурье вектора $\boldsymbol{\nu}$, поэтому, подавив эти гармоники, в «подправленном» векторе $\boldsymbol{\nu}_f$ помеху удаётся существенно ослабить.

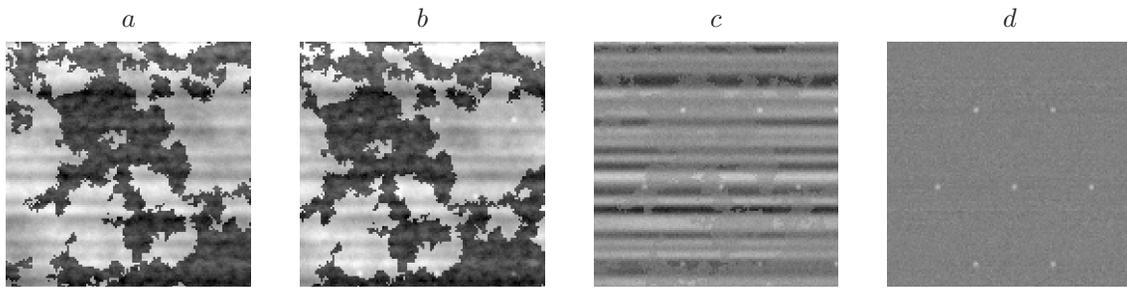


Рис. 1. Коррекция неравномерности чувствительности сканирующего ФПУ
(пояснения рисунков см. в тексте)

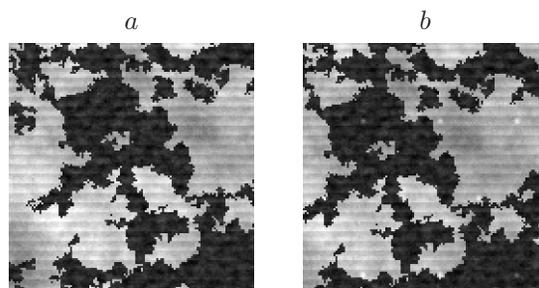


Рис. 2. Периодическая помеха на кадрах после коррекции (рис. *a* и *b* соответствуют рис. 1, *a*, *b*)

Экспериментальная проверка алгоритма коррекции мультипликативной структурной помехи в межкадровой разности. Эксперимент по коррекции мультипликативной помехи выполнялся на синтезированных изображениях, в которых в качестве фоновой основы использовались как крупноформатные космические снимки Земли различных спектральных диапазонов [8], так и изображения пространственно-нестационарных фонов, сформированные с помощью программных средств для моделирования сканирующего ФПУ [9]. Этими же средствами формировались пары взаимно смещённых кадров с подвижными малоразмерными объектами, искажённые мультипликативной структурной помехой и некоррелированным шумом. На рис. 1 приведены результаты межкадрового подавления фона: *a* и *b* — фрагменты двух взаимно смещённых кадров последовательности с пространственно-нестационарным фоном и слабоконтрастными подвижными объектами, сформированной сканирующим приёмником с неравномерной чувствительностью (средне-квадратичное отклонение (СКО) чувствительности — 10 % от среднего значения). Полный размер обрабатываемых кадров составляет 512×512 пикселей, размер представленных фрагментов — 128×128 пикселей. Взаимное смещение — 15 пикселей вдоль и 5 пикселей поперёк направления сканирования. Длина оцениваемых векторов \mathbf{k} и $\mathbf{\nu}$ — 512 элементов.

Рис. 1, *c*, *d* демонстрируют результаты межкадровой обработки без коррекции и с коррекцией неравномерности чувствительности, оценённой предлагаемым способом. Среднее значение фона в исходных кадрах $\sim 146,4$; СКО фона — 53,3; СКО остаточного фона в разностном кадре, полученном без коррекции чувствительности — 23,0; с коррекцией — 3,0. Среднее значение амплитуды объектов ~ 27 , т. е. составляет около половины СКО фона в исходных кадрах, уровень случайного шума фотоприёмника $\sim 2,5$. Все данные представлены в одинаковых единицах. Таким образом, в разностном кадре (6), полученном без коррекции чувствительности, СКО остаточного фона превышает среднее значение амплитуды объектов, что существенно усложняет дальнейшую обработку, целью которой является выделение объектов. Если же разностный кадр получен согласно (7), СКО оста-

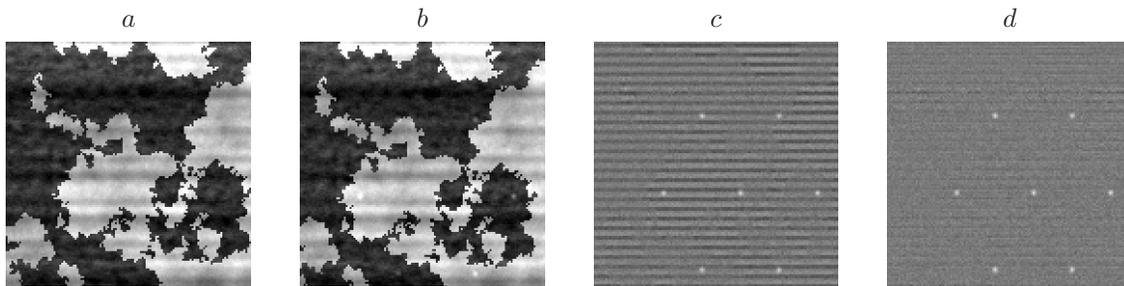


Рис. 3. Разность кадров с величиной поперечного сдвига, отличной от величины, для которой получена первоначальная оценка ν (пояснение рисунков см. в тексте)

точного фона приближается к уровню случайного шума, при этом амплитуда объектов практически не изменяется.

Рис. 2, *a, b* иллюстрируют периодическую помеху, появившуюся в каждом из скорректированных исходных кадров, приведённых на рис. 1, *a, b*.

Как уже упоминалось, в разностном кадре, полученном из них, эта помеха практически исчезает (см. рис. 1, *d*), тогда как при коррекции пары кадров с другой величиной поперечного сдвига она проявляется достаточно заметно, что иллюстрируют рис. 3, *a—c*. Здесь *a* и *b* — фрагменты кадров, полученных при тех же значениях чувствительности, что и на рис. 1, но из другого участка последовательности и с другим смещением (5 пикселей вдоль и 2 пикселя поперёк направления сканирования). На рис. 3, *c* представлен фрагмент разностного кадра с коррекцией вектором ν . Здесь СКО остаточного фона, обусловленное в основном периодической помехой, равно 9,6. Рис. 4 показывает, почему коррекция с использованием оценки, полученной минимизацией (5), приводит к такому результату. На верхнем графике даны первые 128 компонент вектора \mathbf{k} , а на среднем — покомпонентное произведение векторов \mathbf{k} и ν . В идеале можно было ожидать, что все компоненты произведения будут равны 1 с некоторой случайной добавкой, однако в нём явно присутствует периодическая составляющая.

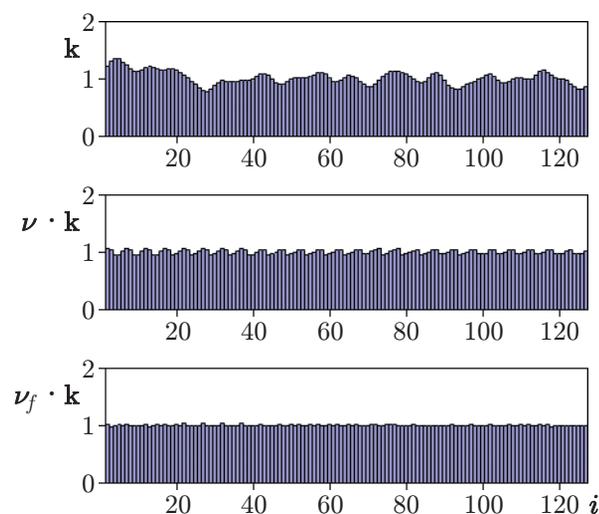


Рис. 4. Неравномерность чувствительности многоэлементного приёмника и результаты её коррекции

Выбор наиболее корректного способа подавления этой составляющей представляет отдельную задачу, которая здесь не рассматривалась. В данной версии алгоритма «подправленный» вектор ν_f получался заменой в фурье-образе вектора ν амплитуд всех гармоник с частотами, кратными $[I/t]$, амплитудами, ослабленными до среднего уровня в области частот, превышающих $[I/t]$. Нижний график на рис. 4 демонстрирует покомпонентное произведение \mathbf{k} и ν_f , а на рис. 3, d приведена межкадровая разность рис. 3, a и b с коррекцией вектором ν_f . Среднеквадратическое отклонение фона в разностном кадре снизилось до 6,2.

Заключение. Предложенный метод калибровки и коррекции пространственно-неравномерной чувствительности сканирующего ФПУ, основанный на анализе пары взаимно смещённых кадров и не требующий для калибровки эталонных источников излучения, позволяет при формировании разностного кадра многократно снизить остаточный фон, практически не ухудшая изображений объектов. Основная область применения метода — подавление фона в изображениях, формируемых движущимся относительно наблюдаемой сцены сканирующим ФПУ, в целях повышения надёжности выделения малоразмерных динамических объектов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121022000116-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tartakovsky A. G., Brown A. P., Brown J. Nonstationary EO/IR clutter suppression and dim object tracking // Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference. Maui, Hawaii, 14–17 Sept., 2010. 10 p.
2. Громилин Г. И., Косых В. П., Попов С. А., Стрельцов В. А. Подавление фона с резкими перепадами яркости в последовательности изображений динамических малоразмерных объектов // Автометрия. 2019. **55**, № 3. С. 3–12. DOI: 10.15372/AUT20190301.
3. Кудинов И. А., Холопов И. С. Алгоритм компенсации геометрического шума изображений коротковолнового инфракрасного диапазона, формируемых фотоприёмниками матричного типа // Сб. тр. VI Междунар. конф. «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ 2020). Самара, 24–26 мая, 2020. Т. 2. С. 643–651.
4. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И. Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2009. **52**, № 6. С. 11–17.
5. Hardie R. C., Hayat M. M., Armstrong E., Yasuda B. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration // Appl. Opt. 2000. **39**, N 8. P. 1241–1250.
6. Zuo C., Chen Q., Gu G., Sui X. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration // JOSA A. 2011. **28**, N 6. P. 1164–1176.
7. Rong Sh.-H., Zhou H.-X., Qin H.-L. et al. Guided filter and adaptive learning rate based non-uniformity correction algorithm for infrared focal plane array // Infrar. Phys. & Technology. 2016. **76**. P. 691–697.
8. Электро-Л. Планета Земля за последние сутки. URL: <http://electro.ntsomz.ru/> (дата обращения: 12.03.2021).
9. Громилин Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А. Особенности процесса сканирования с использованием матричного фотоприёмника в режиме ВЗН // Вычислительные технологии. 2016. **21**, № 1. С. 60–89.

Поступила в редакцию 22.03.2021

После доработки 08.04.2021

Принята к публикации 08.04.2021