

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ НЕОДНОРОДНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНФРАКРАСНЫХ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Цель настоящей статьи – анализ методов коррекции неоднородности чувствительности инфракрасных (ИК) матричных приемников (infrared focal plane array). В статье рассмотрены методы коррекции неоднородности чувствительности ИК матричных приемников, использующие излучатели с известной температурой (черные тела или шторки), а также статистические и фильтрационные методы, основанные на использовании сигналов от наблюдаемой сцены. Даны рекомендации о возможности применения этих методов для ИК приборов различного назначения.

Ключевые слова: инфракрасный матричный приемник, коррекция неоднородности чувствительности.

OLEG KONSTANTINOVICH KUCHERENKO ANATOLII VIKTOROVICH OPICH
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CORRECTION METHODS OF SENSITIVITY INHOMOGENEITY OF INFRARED MATRIX RECEIVERS

Abstract – the use of infrared matrix receivers requires consideration of the heterogeneity of the sensitivity of individual matrix elements (pixels) and compensation for this factor in order to improve the quality of the resulting image. The heterogeneity of the sensitivity of infrared matrix receivers is due to the presence of bad pixels in the matrix, technological errors in the manufacture of matrix receivers (different pixel geometry and correspondingly their area), variation in the sensitivity of individual pixels of the matrix, errors in the electronic processing of signals when they are reading. In order to eliminate the heterogeneity of the sensitivity, a correction is performing which results in obtaining identical output signals from each pixel with the same input action per pixel.

The aim of the work is the analysis of modern methods of correction of nonuniformity correction (NUC) of IR matrix receivers and recommendations on the application of these methods for IR devices of different purposes.

The subject of the article is the effect of methods for correcting the irregularity of the infrared matrix of the focal plane. Methods for correcting the sensitivity of infrared sensor receivers of inhomogeneity using emitters of known temperature (black bodies or veils), as well as in the field of observations, are considered. Denmark recommendations on the use of these methods for IR devices for various purposes.

Results of the study

In practice, two-base groups of NUC methods are used:

- methods using a radiator with a known temperature;
- methods using signals from the observed scene;

Keywords: non-uniformity correction, calibration-based non-uniformity correction, scene-based non-uniformity correction, Kalman filter, constant statistic method.

Введение

Использование ИК матричных приемников требует учета неоднородности чувствительности отдельных элементов матрицы (пикселей) и компенсации этого фактора с целью улучшения качества полученного изображения. Неоднородность чувствительности ИК матричных приемников обусловлена:

- наличием нерабочих пикселей (bad pixels) в матрице (в качественных приемниках их количество составляет 0.01%) [1,3];
- технологическими погрешностями при изготовлении матричных приемников (различная геометрия пикселей и соответственно их площадь);
- изменением во времени чувствительности отдельных пикселей матрицы [1,2,7];
- погрешностями электронной обработки сигналов при считывании.

С целью устранения неоднородности чувствительности проводится коррекция в результате которой обеспечивается получение одинаковых выходных сигналов с каждого пикселя при одинаковом входном воздействии на каждый пиксель.

Целью работы является анализ современных методов коррекции неоднородности чувствительности (Nonuniformity correction (NUC)) ИК матричных приемников и рекомендации по применению этих методов для ИК приборов разного назначения.

Результаты исследования

На практике применяют две основные группы NUC методов [10,18,26,27]:

- методы, использующие излучатель с известной температурой [1, 7, 14, 15, 16];
- методы, использующие сигналы от наблюдаемой сцены [9, 17,19,20,21];

Методы коррекции, использующие излучатель с известной температурой

В этой группе методов предполагается линейная зависимость выходных сигналов пикселей с координатами i,j ИК матричного приемника от потока излучения на входе в произвольный момент времени t [8]:

$$Y_{i,j}(t) = a_{i,j}(t) \cdot X_{i,j}(t) + b_{i,j}(t) \quad (1)$$

где $Y_{i,j}(t)$ – выходной сигнал, $X_{i,j}(t)$ – входной сигнал, $a_{i,j}(t)$ – коэффициент усиления (gain) или яркость, $b_{i,j}(t)$ – коэффициент смещения (offset) или контраст.

В качестве излучателя используются абсолютно черные тела или заслонки/шторки с равномерной температурой. Исследуемые ИК матричные приемники в лабораторных условиях устанавливаются вплотную к черному телу с известной температурой [22]. Излучающая поверхность черного тела создает в высокой степени равномерное излучение, которое направляется на ИК матричный приемник [3]. В полевых условиях использование черных тел для коррекции чувствительности невозможно или затруднено, в связи с чем используются специальные конструкции ИК излучателей (шторки). Шторки могут быть нагретыми до температур ($T_1 \dots T_m$) и имитируют работу черного тела или быть зачернены. В ходе испытаний на каждый пиксель матричного приемника попадает практически равный поток излучения от того или иного излучателя.

Различия в выходных сигналах пикселей корректируются коэффициентами усиления и смещения, согласно схемы представленной на рис.1:

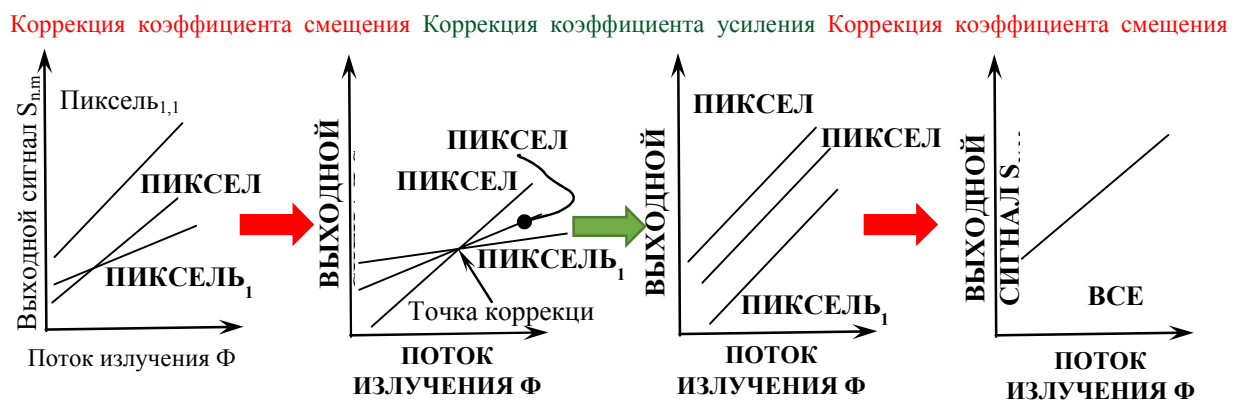


Рис.1. Принцип коррекции неоднородности чувствительности инфракрасных матричных приемников [1]

При использовании одной точки (температуры) коррекции метод называется *одноточечной* коррекцией. Наиболее часто коррекция неравномерности чувствительности ИК матричных приемников производится по двум точкам (T_1, T_2), которые ограничивают диапазон рабочих температур (метод *двухточечной* коррекции).

В этом случае коррекции происходит по линейной схеме, а коэффициенты усиления и смещения рассчитываются следующим образом [25]:

$$a_{i,j}(t) = \frac{Y_{i,j}^{T_2}(t) - Y_{i,j}^{T_1}(t)}{X_{i,j}^{T_2}(t) - X_{i,j}^{T_1}(t)} \quad b_{i,j}(t) = Y_{i,j}^{T_2}(t) - a_{i,j}(t) \cdot X_{i,j}^{T_2}(t) \quad (2)$$

В результате выходной сигнал от пикселей матричного приемника в точках коррекции приобретает вид, приближенный к идеальному выходному сигналу.

В остальных точках (при разных температурах) выходной сигнал отклоняется от идеального значения выходного сигнала как показано на рис.2.

Во избежание этого недостатка применяют *многоточечные* методы [13], где с помощью увеличения количества точек коррекции добиваются более точного соответствия реального и идеального значения выходного сигнала.

Методы коррекции, использующие сигналы от наблюдаемой сцены

Методы, использующие сигналы сцены наблюдения, основаны на обработке специальными алгоритмами кадра или кадров сцены, в поле зрения матричного приемника. Кадром называется сцена, которая наблюдается с помощью матричного приемника, при этом информация изменяется от кадра к кадру, а неоднородность чувствительности остается постоянным во всех кадрах и во времени. Среди этих методов можно выделить две группы:

- фильтрационные [10,22, 23];
- статистические [12, 13,19,20,21].

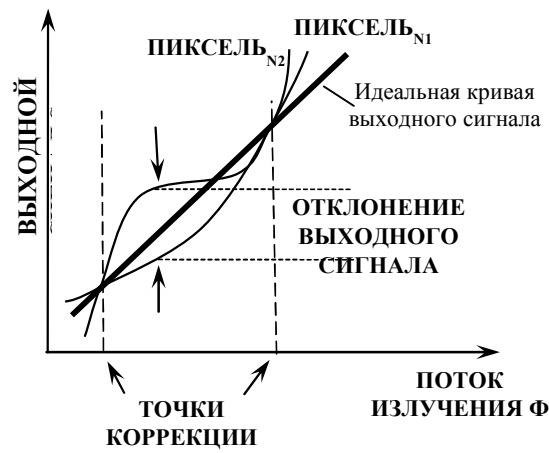


Рис.2 Двухточечный метод [1]

Фильтрационные методы коррекции неоднородности чувствительности основаны на одномерной и двумерной фильтрации выходных сигналов во временной и частотной областях. В кадре высокочастотный сигнал относится к информации о наблюдаемой сцене, а низкочастотный – к информации о неоднородности чувствительности. При отнимании низкочастотного сигнала от высокочастотного происходит коррекция чувствительности матричного приемника. Процесс коррекции показан на рис.3:

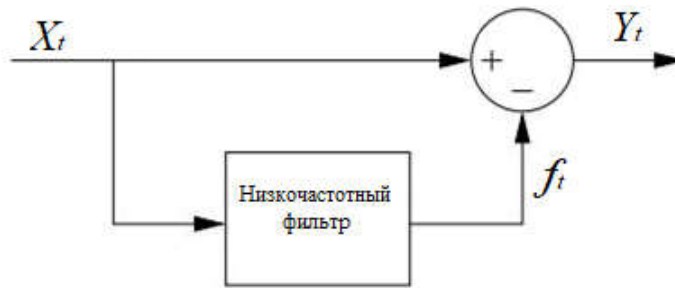


Рис.3 Временной высокочастотный фильтр

Соотношение фильтрации:

$$Y(t) = X(t) - f(t) \tag{3}$$

где $Y(t)$ – выходной сигнал после фильтрации, $X(t)$ – входной сигнал,

$f(t)$ – низкочастотный фильтр, который рассчитывается как:

$$f(t) = \frac{X(t) + (n - 1)f(n - 1)}{n} \tag{4}$$

где n – номер кадра.

Адаптивные фильтры – это нейронная модель, которая работает под управлением алгоритма, что обеспечивает настройку синаптических весов нейронов. Нейрон – единица обработки информации.

Целью нейронной модели есть построение одного выходного сигнала неизвестной динамической системы с несколькими входными на основе нейрона. Принцип обработки входных сигналов показан на рис.4.

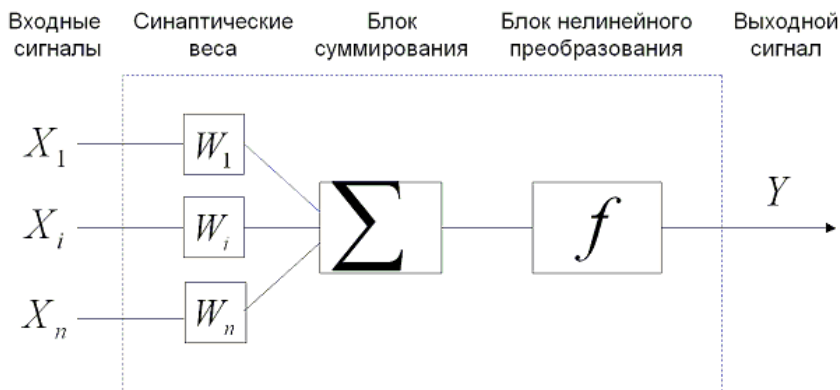


Рис.4 Принцип работы нейронной модели [24].

Алгоритм работы нейронной модели следующий:

1. Входные сигналы умножаются на персональные коэффициенты (синаптические веса).
2. Умноженные на веса входные сигналы суммируются.
3. Вычисляется сигнал ошибки $e(i)$ как отклонение выходного сигнала $y(i)$ от выходного сигнала реальной системы $d(i)$, который еще называется целевым сигналом (targetsignal)

$$e(i) = d(i) - y(i) \quad (5)$$

4. Процесс адаптации, включающий автоматическую подстройку синаптических весов нейрона на основе сигнала ошибки $e(i)$.

Алгоритм применения сигнала ошибки $e(i)$ для коррекции синаптических весов нейрона определяется функцией стоимости, используемой конкретным методом адаптивной фильтрации [23]. Метод Скрибнера (Scribner's algorithm) предполагает использовать линейную модель, представленную формулой (1). В каждом кадре для каждого элемента происходит адаптация коэффициента усиления «а» и коэффициента смещения «b». При вычислении параметров модели для следующего кадра используется нейронная сеть. В данном методе нейронная сеть представляет собой распределенный параллельный процессор, состоящий из нейронов, которые накапливают экспериментальные значения и предоставляют для последующей обработки [23]. При этом формула (1) приобретает следующий вид:

$$X_{i,j}(n) = g_{i,j}(n) \cdot Y_{i,j}(n) + o_{i,j}(n) \quad (6)$$

где параметры $g_{i,j}(n)$ и $o_{i,j}(n)$, связаны с реальными значениями коэффициентов усиления $a_{i,j}(n)$ и

смещения $b_{i,j}(n)$ следующими соотношениями: $g_{i,j}(n) = \frac{1}{a_{i,j}(n)}$ $o_{i,j}(n) = \frac{b_{i,j}(n)}{a_{i,j}(n)}$

(7)

Формулу линейной модели (6) может быть рассмотрена, как простейшая нейронная структура, которая состоит из единичного нейрона с единым синаптическим весом для коэффициента усиления $g_{i,j}(n)$ и смещения $o_{i,j}(n)$. Исходные данные $Y_{i,j}(n)$ попадающие на вход этого нейрона, а затем выходящие из него $\hat{X}_{i,j}(n)$, могут быть представлены, как: $\hat{X}_{i,j}(n) = \hat{g}_{i,j}(n) \cdot Y_{i,j}(n) + \hat{o}_{i,j}(n)$

(8)

где параметры $\hat{g}_{i,j}(n)$ и $\hat{o}_{i,j}(n)$ рекурсивно обновляются.

Далее согласно формулы (5) вычисляется сигнал ошибки $\hat{E}_{i,j}(n)$: $\hat{E}_{i,j}(n) = T_{i,j}(n) - \hat{X}_{i,j}(n)$

(9) где $T_{i,j}(n)$ - целевой сигнал.

Для минимизации сигнала ошибки $\hat{E}_{i,j}(n)$ используют его среднеквадратическое значение:

$$J_{i,j}(n) = \sum_n \hat{E}_{i,j}(n)^2 \quad (10)$$

Тогда соответствующее отклонение для каждого параметра:

$$\frac{\partial J_{i,j}(n)}{\partial \hat{g}_{i,j}} = -2 \cdot E_{i,j} \cdot Y_{i,j} \quad (11)$$

$$\frac{\partial J_{i,j}(n)}{\partial \hat{o}_{i,j}} = -2 \cdot E_{i,j}$$

Необходимо отметить, что функция J(n) будет минимизирована, только тогда, когда частные производные в (11) будут равны нулю.

Рекурсивные коэффициенты усиления и смещения при соответствующей ошибке сигнала рассчитываются как:

$$\hat{g}_{i,j}(n+1) = \hat{g}_{i,j}(n) - \eta_{i,j}(n) \cdot E_{i,j}(n) \cdot Y_{i,j}(n) \quad (12)$$

$$\hat{o}_{i,j}(n+1) = \hat{o}_{i,j}(n) - \eta_{i,j}(n) \cdot E_{i,j}(n)$$

где η - постоянный коэффициент, который называется скоростью обучения [25,26].

Модификация этого алгоритма представлена в работе [27], где $\eta_{i,j}(n)$ определяется, как:

$$\eta_{i,j}(n) = \frac{k}{1 + \sigma_{Y_{i,j}}(n)} \quad (13)$$

где $\sigma_{Y_{i,j}}(n)$ - пространственное среднеквадратическое отклонение входного изображения; k - константа.

Адаптивный фильтр Калмана (АФК), так как и метод Скрибнера является рекурсивным и использует линейную модель:

$$X_{i,j}(n) = g_{i,j}(n) \cdot Y_{i,j}(n) + o_{i,j}(n) + v_{i,j}(n) \quad (14)$$

где $v_{i,j}(n)$ — аддитивный временной шум считывания.

Вывод соотношений для применения АФК для задачи коррекции неоднородности ИК матричных приемников детально рассмотрен в работах [10,18]. Предполагается, что значения коэффициента усиления и смещения от кадра к кадру изменяются незначительно, случайным образом по Гауссу[5] и взаимно некоррелированные. В общем случае алгоритм АФК состоит из двух этапов: предсказания и корректировки чувствительности пикселей ИК матричного приемника. Алгоритм адаптивного фильтра Калмана представлен нарис. 5.



Рис.5 Алгоритм адаптивного фильтра Калмана

Алгоритм АФК включает следующее:

- матрицу описывающую динамику системы

$$\Phi_{k-1} = \begin{bmatrix} \alpha_k & 0 \\ 0 & \beta_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

где $0 \leq \alpha_k \leq 1$ и $0 \leq \beta_k \leq 1$ предполагает изменение коэффициентов усиления (α_k) и смещения (β_k) между состояниями k и $k+1$;

- матрицу управляющего воздействия

$$M'_{k-1} = \bar{X}_0 \begin{bmatrix} 1 - \alpha_k & 0 \\ 0 & 1 - \beta_k \end{bmatrix} \quad (16)$$

где $\bar{X}_0 = [\bar{A}_0 \quad \bar{B}_0]$ - исходное среднее значение коэффициентов усиления и смещения для всех пикселей;

- матрицу шума ошибки ковариации

$$Q_{k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{W_k^{(1)}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{W_k^{(2)}}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

где $\sigma_{W_k^{(1)}}^2$ и $\sigma_{W_k^{(2)}}^2$ - изменение шума ошибки ковариации для коэффициентов усиления и смещения, рассчитывающиеся в соответствии с соотношениями

$$\sigma_{W_k^{(1)}}^2 = (1 - \alpha_K^2)A_0^2 \quad \sigma_{W_k^{(2)}}^2 = (1 - \beta_K^2)B_0^2 ; \quad (18)$$

- матрицу, соответствующую изменению ИК сигнала (T_K)

$$\overline{H}_K = \begin{bmatrix} 0.5(T_K^{\min} + T_K^{\max}) & I \\ \vdots & \vdots \\ 0.5(T_K^{\min} + T_K^{\max}) & I \end{bmatrix} \quad (19)$$

- ошибку выходного сигнала

$$R_K = I_{l_k} \sigma_{V_K}^2 \quad (20)$$

где I_{l_k} - матрица идентичности размером $l_k \times l_k$; $\sigma_{V_K}^2$ - изменение аддитивного шума блока кадров k ; l_k - протяженности блока кадров (k) из пкадров;
- матрицу наблюдения

$$D = \sigma_T^2 + (\sigma_{A_0}^2 + \overline{A_0})I_{l_k} \quad (21)$$

где $\sigma_T^2 = \frac{I}{12}(T_K^{\min} - T_K^{\max})^2$ среднее значение матрицы наблюдения; $\sigma_{A_0}^2$ - предполагаемое изменение коэффициента усиления.

Статистические методы коррекции неоднородности чувствительности матричных приемников основаны на анализе и использовании статистических характеристик тепловизионных изображений, в частности гистограмм выделяемых объектов, кластеризации, и т.п.. Наиболее распространены два статистических метода: глобальной постоянной статистики (Globalconstantstatistic(GCS)) и локальной постоянной статистики (Localconstantstatistic (LCS)).

Метод GCS основан на линейной реакции пикселя на входное воздействие в соответствии с формулой (1). Так же метод предполагает одинаковое среднее значение входного потока от времени $m_{i,j}(n)$ и одинаковое среднеквадратическое отклонение $\sigma_{i,j}(n)$ входного потока попадающего на все пиксели ИК матричного приемника. Для этого необходимо, чтобы все пиксели наблюдали все возможные значения освещенности сцены наблюдения во времени [28].

Сигнал наблюдаемый от сцены наблюдения будет равен:

$$X_{i,j}(n) = \frac{Y_{i,j}(n) - m_{i,j}(n)}{\sigma_{i,j}(n)} \quad (22)$$

где $m_{i,j}(n)$ и $\sigma_{i,j}(n)$ рассчитываются в соответствии с формулами:

$$m_{i,j}(n) = \frac{Y_{i,j}(n) + (n-1) \cdot m_{i,j}(n-1)}{n} \quad (23)$$

$$\sigma_{i,j}(n) = \frac{|Y_{i,j}(n) - m_{i,j}(n)| + (n-1) \cdot \sigma_{i,j}(n-1)}{n}$$

Тогда подставляя (23) в (22) получим:

$$X_{i,j}(n) = \frac{Y_{i,j}(n) - m_{i,j}(n)}{\sigma_{i,j}(n)} \times \langle \sigma_{i,j}(n) \rangle + \langle m_{i,j}(n) \rangle = \frac{Y_{i,j}(n) - \overline{b}_{gcs}}{\overline{g}_{gcs}} \quad (24)$$

где $\overline{b}_{gcs} = m_{i,j}(n) - \overline{g}_{gcs}$ - нормированное значение коэффициента смещения;

$\overline{g}_{gcs} = \frac{\sigma_{i,j}(n)}{\langle \sigma_{i,j}(n) \rangle}$ - нормированное значение коэффициента усиления;

$\langle \bullet \rangle$ - пространственное усреднение сигналов всех элементов ИК матрицы.

Метод GCS дает необходимый результат только, когда все пиксели ИК матричного приемника наблюдают одинаковое входное воздействие. Вне лабораторных условий это сложно реализуемо. По этой причине метод LCS предполагает, что временное распределение входного воздействия постоянно на каждом локальном пикселе, но неоднородно по ИК матричному приемнику.

Сигнал сцены $X_{i,j}(n)$, так как и в методе GCS будет равен [28]:

$$X_{i,j}(n) = \frac{Y_{i,j}(n) - \bar{b}_{lcs}}{\bar{g}_{lcs}} \quad (25)$$

где \bar{b}_{lcs} и \bar{g}_{lcs} определяются следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} \bar{b}_{lcs} &= HSF\left(m_{i,j}(n) - \bar{g}_{lcs} \langle m_{i,j}(n) \rangle\right) \\ \bar{g}_{lcs} &= HSF\left(\frac{\sigma_{i,j}(n)}{\langle \sigma_{i,j}(n) \rangle}\right) + I_{lcs} \end{aligned} \quad (26)$$

где $HSF(\bullet)$ – высокочастотная пространственная компонента сцены наблюдения;

I_{lcs} – матрица идентичности пикселей матрицы.

Заключение

Компенсация неравномерности чувствительности матричных ИК приемников излучения является важной научно-технической задачей, решению которой посвящено много публикаций в отечественной и зарубежной литературе. Актуальность решения этой проблемы связана как с необходимостью повышения точности измерений температуры ИК радиометрами, так и с улучшением качества изображения тепловизионных приборов различного назначения.

Методы коррекции, использующие излучатель с известной температурой, имеют тот недостаток, что коррекция неоднородности чувствительности выполняется в отдельных точках графика зависимости потока ИК излучения от температуры. При этом не учитываются такой фактор как временная зависимость чувствительности пикселей матрицы от температуры. Кроме того, не учитывается температурная зависимость коэффициента излучательной способности материалов от температуры. Например, в [1] рассмотрена погрешность экспериментального измерения температуры тепловизором с матричным приемником. По результату двухчасовых измерений температуры 70°C, флуктуация измеряемой температуры матричным приемником составила $\pm 3^\circ\text{C}$ без включения автоматической коррекции неоднородности чувствительности и $\pm 2^\circ\text{C}$. с включенной функцией. В связи с этим одно или многоточечные методы коррекции по излучателю с известной температурой эффективны в коротком промежутке времени и не могут в полной мере устранить неоднородность чувствительности из – за ее временные изменения.

Фильтрационные и статистические методы существенно усложняют алгоритм обработки сигнала с матричного фотоприемника. Они основаны на сигналах сцены и требуют большого количества кадров для последующего анализа. Например, в работе [12] говорится о необходимости использования последовательности из 1500 кадров для коррекции неравномерности чувствительности по предложенному алгоритму. Проведение подобной коррекции может быть рекомендовано в лабораторных условиях, когда создание сигналов сцены может быть осуществлено при применении имитаторов ИК излучения, создающих различную фоновую-целевую обстановку, соответствующую реальным условиям работы ИК прибора.

Литература

1. Vollmer M., Möllmann K. *Infrared Thermal Imaging_ Fundamentals, Research and Applications* – Weinheim, Germany, 2014. – 611 С.
2. Mudau A., Willers C., Griffith D., Roux F., Non-uniformity correction and bad pixel replacement on lwir and mwir images : сб. науч. праць . – Conference (SIEPC), 2011.
3. Сергунов А. А., Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Известия вузов Приборостроение. – 2009. – № 8 – С. 38-42.
4. Zhang C., Zhao W. Scene-based nonuniformity correction using local constant statistics // J. Opt. Soc. Am. – 2008. – № 25 – С. 1444–1453.
5. Соляков В.Н., Жегалов С.И., Фетюхина В.Г. Метод линеаризованной трехточечной коррекции неоднородности фотоприемных устройств // Прикладная физика. – 2010. – № 4 – С. 110-115.
6. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И., Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Известия вузов Приборостроение. – 2009. – № 6 – С. 11-17.
7. Бехтин Ю.С., Гурьева М.Н., Коррекция геометрического шума матричных фотоприемников на основе вейвлет-преобразования // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 5 – С. 57-61.
8. Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction [Электронный ресурс] :
9. http://www.ece.unm.edu/faculty/hayat/spie_04_ratliff.pdf
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. Издательский дом

“Вильямс”, 2006. – 1104с.

11. Популярные нейросетевые архитектуры [Электронный ресурс]: <http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/57>

12. E. Vera and S. Torres, Fast adaptive non uniformity correction for infrared focal-plane array detectors// EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2005. – № 13 С. 1994-2004.

13. Zuo C., Chen Q., Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics// Optical Engineering – 2003. – №8 С.1-11.

14. Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И., Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Известия вузов Приборостроение. – 2009. – № 6 – С. 11-17.

15. Olbrycht R., Wiecek B., Swiatczak T., New method for two-point nonuniformity correction of microbolometer detectors: зб. наук. праць . – 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2010, Québec (Canada).

16. Olbrycht R., Wiecek B., Microbolometer matrix gain non-uniformity determination and correction with the aid of ring and spot infrared emitters. – 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2012, Naples (Italy).

17. Бехтин Ю.С., Гурьева М.Н., Коррекция геометрического шума матричных фотоприемников на основе вейвлет-преобразования // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 5 – С. 57-61.

18. Бехтин Ю.С., Гурьева М.Н., Методы компенсации геометрического шума матричного фотоприемника в телевизионной камере на основе приборов с зарядовой связью с диодами Шоттки // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – № 2 – С. 52-58.

19. Torres S., Hayat M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays // J. Opt. Soc. Am. A – 2003– N. 3 – С.470-481.

20. Пат. US 7,782,378 Scene-based non-uniformity correction method using local constant statistics/ Zhang C., Zhao W.; заявл. 10.10.2007; опублик. 24.08.2010.

21. Пат. US 8,203,116 Scene-based non-uniformity correction for infrared detector arrays / Young C.; заявл. 19.10.2010; опублик. 19.06.2012.

22. Пат. US 7,933,464 Scene-based non-uniformity correction and enhancement method using super-resolution / Zhang C., Zhao W.; заявл. 16.10.2007; опублик. 26.06.2011.

23. Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction [Электронный ресурс] :

24. http://www.ece.unm.edu/faculty/hayat/spie_04_ratliff.pdf

25. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104с.

26. Популярные нейросетевые архитектуры [Электронный ресурс]: <http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/57>.

27. Torres N., Vera M., Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays// Infrared imaging systems: design, analysis, modeling, and testing – 2003. – С. 130-139.

28. E. Vera and S. Torres, Fast adaptive non uniformity correction for infrared focal-plane array detectors// EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2005. – № 13 С. 1994-2004.

29. Zuo C., Chen Q., Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics// Optical Engineering – 2003. – №8 С.1-11. .

Reference

1. Vollmer M., Möllmann K. Infrared Thermal Imaging_ Fundamentals, Research and Applications – Weinheim, Germany, 2014. – 611С.

2. Mudau A., Willers C., Griffith D., Roux F., Non-uniformity correction and bad pixel replacement on lwir and mwir images : зб. наук. праць . – Conference (SIEPC), 2011.

3. Sergunov A. A., Metodi korrekcii neravnomernosti chuvstvitelnosti infrakrasnih matrichnih fopriemnikov // Izvestiya vuzov Priborostroenie. – 2009. – № 8 – С. 38-42.

4. Zhang C., Zhao W. Scene-based nonuniformity correction using local constant statistics // J. Opt. Soc. Am. – 2008. – № 25 – С. 1444–1453.

5. Solyakov V.N., Jegalov S.I., Fetyuhina V.G. Metod linearizovannoi trehtochечноi korrekcii neodnorodnosti fopriemnih ustroistv Prikladnaya fizika. – 2010. – № 4 – С. 110-115.

6. Borzov S. M., Kozik V. I., Potaturkin O. I., Korrekciya teplovizionnih izobrazhenii na osnove statisticheskoi obrabotki realnih dannih // Izvestiya vuzov Priborostroenie. – 2009. – № 6 – С. 11-17.

7. Behtin Yu.S. Gureva M.N. Korrekciya geometricheskogo shuma matrichnih fopriemnikov na osnove veivlet_preobrazovaniya // Izvestiya Yugo_Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013. – № 5 – С. 57-61.

8. Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction [Электронный ресурс] :

9. http://www.ece.unm.edu/faculty/hayat/spie_04_ratliff.pdf

10. Haikin S. Neironnie seti: polnii kurs, 2-e izdanie. : Per. s angl. – M. Izdatelskii dom “Vilyams”, 2006. – 1104с.

11. Populyarnie neirosetevie arhitekturi [Elektronnii resurs]: <http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/57>

12. E. Vera and S. Torres, Fast adaptive non uniformity correction for infrared focal-plane array detectors// EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2005. – № 13 С. 1994-2004.

13. Zuo C., Chen Q., Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics// Optical Engineering – 2003. – №8 С.1-11.

14. Borzov S. M., Kozik V. V., Potaturkin O. I., Korrekciya teplovizionnih izobrazhenii na osnove statisticheskoi obrabotki realnih dannih // Izvestiya vuzov Priborostroenie. – 2009. – № 6 – С. 11-17.

15. Olbrycht R., Wiecek B., Swiateczak T., New method for two-point non-uniformity correction of microbolometer detectors: зб. наук. праць .– 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2010, Québec (Canada).
16. Olbrycht R., Wiecek B., Microbolometer matrix gain non-uniformity determination and correction with the aid of ring and spot infrared emitters. – 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2012, Naples (Italy).
17. Behtin Yu.S., Gureva M.N., Korrekciya geometricheskogo shuma matrichnih fotopriemnikov na osnovе veivlet_preobrazovaniya // Izvestiya Yugo_Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013. – № 5 – С. 57-61.
18. Behtin Yu.S., Gureva M.N., Metodi kompensacii geometricheskogo shuma matrichnogo fotopriemnika v televizionnoi kamere na osnovе priborov s zaryadovoi svyazyu s diodami Shottki // Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika. – 2006. – № 2 – С. 52-58.
19. Torres S., Hayat M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays // J. Opt. Soc. Am. A – 2003– N. 3 –С.470-481.
20. Пат. US 7,782,378 Scene-based non-uniformity correction method using local constant statistics/ Zhang C., Zhao W.; заявл. 10.10.2007; опубл. 24.08.2010.
21. Пат. US 8,203,116 Scene-based non-uniformity correction for infrared detector arrays / Young C.; заявл. 19.10.2010; опубл. 19.06.2012.
22. Пат. US 7,933,464 Scene-based non-uniformity correction and enhancement method using super-resolution / Zhang C., Zhao W.; заявл. 16.10.2007; опубл. 26.06.2011.
23. Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction [Электронный ресурс] :
24. http://www.ece.unm.edu/faculty/hayat/spie_04_ratliff.pdf
25. Haikin S. Neironnie seti: polnii kurs, 2-e izdanie. : Per. s angl. – M. Izdatelskii dom “Vilyams”, 2006. – 1104с.
26. Populyarnie neirosetevie arhitekturi [Elektronii resurs]: <http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/57>.
27. Torres N., Vera M., Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays// Infrared imaging systems: design, analysis, modeling, and testing – 2003. – С. 130-139.
28. E. Vera and S. Torres, Fast adaptive non uniformity correction for infrared focal-plane array detectors// EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2005. – № 13 С. 1994-2004.
29. Zuo C., Chen Q., Scene-based nonuniformity correction method using multiscale constant statistics// Optical Engineering – 2003. – №8 С.1-11.

Рецензія/Peer review : 05.11.2017 р. Надрукована/Printed : 16.01.2018 р.
Стаття рецензована редакційною колегією Боровицький, кафедра оптичних і оптико-електронних приборів, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сикорського»