

## Improved method for equalization temperature-induced non-uniformities in microbolometer FPA response

M. A. Dem'yanenko, V. N. Ovsyuk

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia

*Method for equalization temperature-induced non-uniformities in microbolometer IR FPA response based on use of variations of prior heating and measuring impulses applied both to sensitive and to compensating bolometers is proposed. Carried out numerical simulation of proposed FPA architecture demonstrates high quality of signal equalization over wide temperature range that allows to apply microbolometer FPAs indoors without use any additional measures such as temperature stabilization and real-time correction.*

УДК 621.385

## Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены

В. Н. Соляков, С. И. Жегалов, Л. Д. Сагинов, А. М. Филачев,  
К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, А. Н. Свиридов

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Рассмотрен метод коррекции неоднородности чувствительности многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ) без использования опорных источников однородного излучения. Метод решает актуальную для оптико-электронных систем ИК-диапазона спектра задачу устранения неоднородности сигналов из-за различий чувствительности отдельных элементов ФПУ к входному потоку излучения. Для определения корректирующих коэффициентов используются сигналы сцены, по которым для каждого элемента определяется пара корректирующих коэффициентов по смещению и чувствительности. Процесс коррекции состоит в периодически выполняемой процедуре определения корректирующих коэффициентов и непрерывно выполняемой процедуре корректирования сигналов. Рассмотрены способы технической реализации метода и получены расчетные выражения для определения корректирующих коэффициентов. Проанализированы факторы, характеризующие точность метода в зависимости от сцены, которые определяют его применимость как для матричных, так и для многорядных ФПУ со сканированием.*

Одна из наиболее важных и решающих задач цифровой обработки сигналов изображений матричных и многорядных ФПУ ИК-диапазона спектра — устранение неоднородности сигналов, обусловленной различиями в значениях чувствительности и темновых токов отдельных фоточувствительных элементов ФПУ.

В настоящее время наиболее широкое применение находит метод двухточечной коррекции [1, 2], при котором на все элементы МФПУ подаются одинаковые оптические эталонные сигналы двух уровней. Этот метод обеспечивает коррекцию с достаточной точностью [3, 4], но при работе в широком диапазоне изменений мощности оптического излучения требуется подстройка эталонов под

интенсивность сигналов сцены. Во многих случаях наличие эталонных источников вообще не приемлемо, например, по условиям размещения этих источников в аппаратуре применения.

В ряде публикаций [5—7] рассматриваются вопросы реализации коррекции без использования эталонных источников. Применение для калибровки сигналов сцены позволяет упростить оптико-механическую часть тепловизионной или тепловизионной аппаратуры, однако требует дополнительных вычислительных ресурсов. В известных методах коррекции неоднородности предлагаются различные алгоритмы, основанные на определенных требованиях к параметрам регистрируемой сцены. Методика калибровки по сцене

исходит из выявления по сигналам МФПУ дефектных элементов и компонент неоднородности (геометрического шума) на фоне временного шума. Сложная смесь шума, неоднородности и дефектов элементов МФПУ с нерегулярным характером сцены и дрейфом неоднородности требуют точного анализа и разделения этих факторов, что ставит задачу калибровки по сцене на уровень проблемы.

Рассматриваемый в настоящей работе метод в качестве источника информации для корректировки неоднородности как и в работах [5—7] использует сигналы сцены, но при этом для каждого элемента может быть определена пара корректирующих коэффициентов – по смещению и чувствительности, при достаточном уровне изменчивости сцены на элементе. При недостаточной изменчивости сигналов сцены производится одноточечная коррекция. Одновременно обнаруживаются дефекты элементов.

С помощью известных способов [5, 6], использующих сцену для коррекции неоднородности сканирующих ФПУ, по усредненным сигналам определяют строчные корректирующие коэффициенты и осуществляют коррекцию умножением значений отсчетов сигналов на эти коэффициенты. Недостаток способа — использование только одного корректирующего коэффициента для компенсации сигнала, в то время как для всех матричных ФПУ неоднородность характеризуется, как минимум, двумя параметрами. В случае простых сцен, с плавным изменением яркости, для поддержания корректирующей способности достаточно простого усреднения. С усложнением сцен требуются более сложные методы (окна) усреднения. Этот фактор ограничивает применимость способа.

Для матричных ФПУ известен метод коррекции неоднородности [7], заключающийся в том, что калибруют по двухточечной схеме элементы ФПУ по периметру матрицы и по отсчетам калиброванных и отсчетам остальных, некалиброванных элементов, определяют коэффициенты коррекции элементов ФПУ по смещению. Метод применим, если в неоднородности сигналов доминирует неоднородность смещения. Помимо этого применимость ограничивает необходимость использования эталонных сигналов для калибровки элементов периметра матрицы.

Также для матричных ФПУ известен адаптивный к сигналам сцены метод коррекции неоднородности элементов [8], в котором по текущим и скорректированным предшествующим отсчетам определяют корректирующие коэффициенты по чувствительности и смещению и корректируют текущие отсчеты. Недостаток метода вытекает из условия, что изменчивость сцены не должна пре-

вышать способности алгоритма к подстройке корректирующих коэффициентов — параметр "скорость обучения" [8]. Быстрые изменения сцены дадут большой разброс корректирующих коэффициентов, слабо связанный с изменением сцены. Этот фактор неустойчивости ограничивает применение способа.

Анализ литературных источников подчеркивает классификацию методов коррекции неоднородности ФПУ по сцене и по обработке сигналов [9] на адаптивные методы без обратной связи и адаптивные с обратной связью. Если сложность анализа и разработки первых можно оценить как приемлемую, то сложность вторых существенно выше, прежде всего из-за трудностей оценки условий надежного функционирования методов с обратной связью, если вообще такие условия существуют.

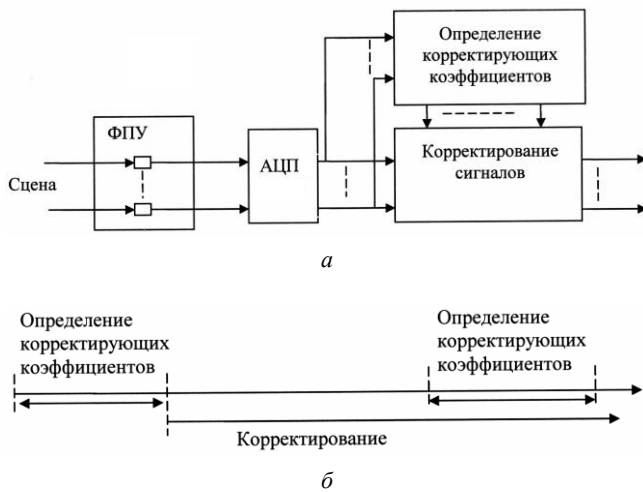
Предлагаемый метод относится к методам без обратной связи и для него могут быть получены теоретические и модельные оценки точности. По реализации он вписывается в распространенную схему двухточечной коррекции и в зависимости от сцены адаптируется к одно- или совместно к двух- и одноточечной коррекции. Метод может быть обобщен и на случай трехточечной коррекции. Возможность одновременно производить и обнаруживать дефекты способствует полноте решения задачи предварительной обработки сигнала.

### Общая схема процесса коррекции

Основа предлагаемого метода — идея определения корректирующих коэффициентов через межэлементные связи, выявляемые по сигналам сцены. Поэлементные накопления сумм и изменений сигналов устанавливают межэлементные парные соотношения неоднородности. Приняв уровень сигнала какого-либо одного из элементов ФПУ за базовый, не корректируемый, по межэлементным соотношениям определяются скорректированные, однородные сигналы всех элементов.

Общая схема процесса коррекции показана на рисунке, где структурная схема представляет собой прохождение сигнала сцены через функциональные блоки преобразования сигнала (ФПУ и АЦП) и обработки — определения корректирующих коэффициентов и корректирования, а временная схема показывает последовательность определений коэффициентов и процесс корректирования. Во времени процесс коррекции неоднородности состоит в периодически выполняемой процедуре определения корректирующих коэффициентов элементов ФПУ и непрерывно выполняемом корректировании сигналов сцены. Процесс корректирования начинается с момента окончания первого определения корректирующих коэффициентов.

Периодичность определения корректирующих коэффициентов зависит от изменчивости (дрейфа) параметров передачи элементов ФПУ.



**Общая блок-схема коррекции:**

*a* — структурная схема; *b* — временная схема

По классификации [9] предлагаемый метод относится к адаптивным без обратной связи. Его адаптивность состоит в том, что блок определения корректирующих коэффициентов из проведенных измерений входных сигналов извлекает информацию о неоднородности и вводит ее в виде корректирующих коэффициентов в формулы корректирования, по которым блок-схемы "Корректирование сигналов" корректируют те же самые входные сигналы.

## Модель регистрации элементов сцены

### Сцена

Определение модели сцены исходит из экранного представления изображения: сцена представляется как меняющийся во времени двухмерный образ (экран), отображаемый в виде множества потоков  $PS(x, y, t)$  — поток для точки экрана с дискретными координатами по ширине и высоте  $x$  и  $y$ , соответственно, в дискретные моменты времени  $t = 1, 2, \dots$ ;  $x = 1, 2, \dots, M_k$ ;  $y = 1, 2, \dots, N_k$ ;  $M_k$  — ширина экрана (точек);  $N_k$  — высота, потоки  $PS(x, y, t) \geq 0$ .

### Модель элемента ФПУ

Выходной сигнал элемента  $S(t)$  в зависимости от попадающего на него в момент  $t$  потока  $P(t)$  представляется в виде

$$S(t) = FM(P(t)) + EM(P(t)) + SH(t),$$

где  $FM(t)$  — модель реакции элемента на входной поток; предполагается, что входной, попадающий

на элемент, поток образуют поток сцены  $PS(t)$  и фоновый, попадающий, помимо сцены, поток  $PF(t)$ ,

$$P(t) = PS(t) + PF(t);$$

$EM(P(t))$  — модельная ошибка этой реакции — предполагается существование более точной модели, "истинной" модели, для которой  $EM(P(t)) \rightarrow 0$  и подбором модели  $FM(t)$  можно приблизиться к этой "истинной" модели (модельную ошибку еще называют ошибкой выбора модели);

$SH(t)$  — шум на выходе элемента, в котором могут быть представлены две составляющие: шум собственно элемента и шум входного потока, но для последующего анализа такое подразделение непринципиально.

Помимо шумов и модельной ошибки введем еще одну ошибку — ошибку оценивания модели  $EM(P(t))$ , которую определим как

$$EM(P(t)) = FM^*(P(t)) - FM(P(t)),$$

где  $FM(P(t))$  — оценка модели  $FM^*(P(t))$ .

Ошибка оценивания модели обусловлена ограниченностью выборки и неоптимальностью методов оценивания.

Совокупную ошибку представим в виде

$$E(t) = EM(P(t)) + SH(t) + EM(P(t)) = FM^*(P(t)) - FM(P(t)) + SH(t) = EM^*(P(t)) + SH(t),$$

где  $FM^*(P(t))$  — "истинная" модель элемента;

$EM^*(P(t))$  — ошибка оценивания "истинной" модели, включающая модельную и ошибку оценивания модели.

Среди моделей  $FM(P(t))$  целесообразна из-за простоты реализации. Рассмотрим полиномиальную модель

$$FM(P(t)) = B + A P(t) + C P^2(t) + DP^3(t) + \dots,$$

частным случаем которой является линейная модель "смещение + усиление"

$$FM(P(t)) = B + A P(t),$$

которая в основном и будет рассматриваться.

### Матричное ФПУ

Обозначим  $N_m \times M_m$  — размер матрицы (в элементах), соответственно, высота и ширина.

Матричному ФПУ ставится в соответствие кадр изображения размером  $N_k \times M_k$  ( $N_k = N_m$ ,  $M_k = M_m$ ) точкам которого соответствуют отсчеты элементов ФПУ, связанные со сценой и фоновым потоком соотношением

$$P_{n,m}(t) = PS(n, m, t) + PF_{n,m}(t), \quad n = 1, 2, \dots, N_m;$$

$$m = 1, 2, \dots, M_m; \quad t = 1, 2, \dots,$$

$PF_{n,m}(t)$  — фоновый поток ( $n, m$ )- элемента.

Выход  $(n,m)$ - элемента ФПУ в зависимости от потока представим в виде

$$S_{n,m}(t) = A_{n,m}P_{n,m}(t) + B_{n,m} + SH_{n,m}(t),$$

где  $A_{n,m}$  — чувствительность элемента;

$B_{n,m}$  — смещение;

$SH_{n,m}(t)$  — шум на выходе элемента.

### Линейчатое ФПУ

Размеры линейки (в элементах), соответственно, в высоту и ширину обозначим  $N_L$  и  $M_L$ , где высота — число строк линейки; ширина — число элементов в строке линейки. Например, для линейки  $4 \times 288$  высота равна 288, а ширина 4.

Линейке ставится в соответствие  $(N_K \times M_K)$  — кадр изображения, где  $N_K = 2 N_L$  или  $N_K = N_L$ , в зависимости от режима сканера,  $M_K$  определяется числом отсчетов сканера за один проход.

Сканер определяет распределение сигналов сцены по элементам линейки, это распределение рассмотрим для двух режимов сканирования.

*Сканирование в два хода сканера на кадр со сдвигом изображения со сканера при четном ходе относительно нечетного на полэлемента вверх по высоте линейки*

Потоки, попадающие на элементы линейки, определяются по формуле

$$P_{n,m}((N_c - 1)M_K + x) = PS(x, 2n - N_c \bmod 2(N_c - 1) \times (M_K + T_{MX}) + (x - 1 + m)) + PF_{n,m}((N_c - 1)M_K + x),$$

где  $n$  и  $m$  — положение элемента в линейке,

$n$  — номер строки,  $m$  — номер элемента внутри строки,  $n = 1, 2, \dots, N_L$ ,  $m = 1, 2, \dots, M_L$ ;

$P_{n,m}((N_c - 1)M_K + x)$  — поток на элементе  $(n, m)$

для отсчета с номером  $(N_c - 1)M_K + x$ ;

$PF_{n,m}((N_c - 1)M_K + x)$  — фоновый поток на элементе  $(n, m)$  для отсчета с номером  $(N_c - 1)M_K + x$ ;

$N_c$  — номер хода сканера,  $N_c = 1, 2, \dots$ ;

$x$  — положение отсчета в кадре по горизонтали,  $x = 1, 2, \dots, M_K$ ;

$T_{MX}$  — интервал времени между ходами сканера — концом предыдущего и началом следующего.

Отсчеты элементов линейки за два хода сканера, нечетный и четный, составляют  $M_L$  растров (здесь растр — соответствующий элементам одного ряда линейки кадр) изображения размером  $N_K \times M_K$ ,

$N_K = 2 N_L$ . Нечетные ходы сканера обеспечивают нечетные строки кадров, четные — соответственно, четные.

*Сканирование в два хода сканера на кадр со сдвигом изображения со сканера при четном ходе относительно нечетного на элемент вверх по высоте линейки*

Потоки, попадающие на элементы линейки, определяются по формуле

$$P_{n,m}((N_c - 1)M_K + x) = PS(x, n - 1 + N_c \bmod 2(N_c - 1) \times (M_K + T_{MX}) + (x - 1 + m)) + PF_{n,m}((N_c - 1)M_K + x).$$

### АЦП-преобразование

Функцию аналого-цифрового преобразования сигнала  $S_{n,m}(t)$  обозначим через АЦП ( $S_{n,m}(t)$ ).

$$\text{АЦП} (S_{n,m}(t)) = \left[ \frac{S_{n,m}(t)D_s}{S_{\max}} \right],$$

где  $[0, D_s]$  — диапазон преобразованных значений в целых числах от 0 до  $D_s$ , квадратные скобки в правой части означают округление содержимого внутри них до ближайшего целого значения.

Погрешность АЦП-преобразования в модели присовокупим к шумовой компоненте.

### Парные связи элементов ФПУ

Соседними элементами ФПУ являются близкие по сигналам сцены элементы. Формально близость характеризуется разностью вектора параметров сигналов сцены, попадающих на сопоставляемые элементы, сигналу сцены  $S(x, y, t)$ , попадающему на элемент, например матричного ФПУ (пусть элемент не в углу или не на периметре), соответствуют одновременные ( $\Delta t = 0$ ) и смежные по геометрии ( $\Delta x = \pm 1$  или  $\Delta y = \pm 1$ ) сигналы  $S(x - 1, y, t)$   $S(x + 1, y, t)$   $S(x, y - 1, t)$   $S(x, y + 1, t)$  смежных элементов.

В линейчатом ФПУ для некоторого элемента в произвольной строке соседними являются элементы этой же строки и элементы соседних верхней и нижней строк. Причем ближайшими среди соседних являются элементы той же строки, а ближайшими среди них — ближе (по топологии) расположенные.

В общем случае в качестве соседних могут рассматриваться и более "дальние" элементы, если "ближние" соседние элементы дефектные или связи с ними дефектные (см. ниже). Обозначать соседние элементы по отношению к некоторому элементу  $(n, m)$ , будем через  $(n+, m+)$ , т. е. элемент

$(n, m)$  имеет в качестве соседних множество  $\{n+, m+\}$  элементов, а  $(n+, m+)$  — любой один соседний элемент. При одномерной индексации элементов (такой тоже будем пользоваться) соседний  $i$ -му элемент запишется как  $i+$ .

Обозначим сигналы пары соседних элементов через  $S_i(t)$  и  $S_{i+}(t)$ ,

где  $S_i(t) = A_i P_i(t) + B_i + SH_i(t)$  — сигнал  $i$ -го элемента;

$S_{i+}(t) = A_{i+} P_{i+}(t) + B_{i+} + SH_{i+}(t)$  — сигнал соседнего элемента, обозначен  $i+$ .

Рассмотрим линейные регрессии сигналов этих элементов друг на друга: регрессию  $S_i(t)$  на  $S_{i+}(t)$  и регрессию  $S_{i+}(t)$  на  $S_i(t)$ .

$$S_{i+}(t) = A_{i+,i} S_i(t) + B_{i+,i} + E_{i+,i}(t),$$

$$S_i(t) = A_{i,i} S_{i+}(t) + B_{i,i+} + E_{i,i+}(t),$$

где  $A_{i+,i}$ ,  $B_{i+,i}$ ,  $E_{i+,i}(t)$  и  $A_{i,i+}$ ,  $B_{i,i+}$ ,  $E_{i,i+}(t)$  — коэффициенты и ошибки этих регрессий, соответственно, равны:

$$\begin{aligned} A_{i+,i} &= \frac{\sum_{t \in T} [S_{i+}(t) - \bar{S}_{i+}(t)][S_i(t) - \bar{S}_i(t)]}{\sum_{t \in T} [S_i(t) - \bar{S}_i(t)]^2} = \\ &= \frac{\sum_{t \in T} \Delta S_{i+}(t) \Delta S_i(t)}{\sum_{t \in T} [\Delta S_i(t)]^2} = \frac{\sum_{t \in T} A_{i+} \Delta P_{i+}(t) A_i \Delta P_i(t)}{\sum_{t \in T} A_i^2 \Delta P_i^2(t) + \sum_{t \in T} SH_i^2(t)} = \\ &= \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{R_{i+,i} \sigma_{P_{i+}} \sigma_{P_i}}{\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{SH_{i+}}^2 / A_i^2} = \frac{A_{i+}}{A_i} (1 + \varepsilon_{i+,i}) = \\ &= \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} \frac{R_{i+,i}}{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_i^2 \sigma_{P_i}^2}}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$B_{i+,i} = \bar{S}_{i+}(t) - A_{i+,i} \bar{S}_i(t),$$

$$E_{i+,i}(t) = S_{i+}(t) - A_{i+,i} S_i(t) + B_{i+,i}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{i,i+} &= \frac{A_i}{A_{i+}} \frac{R_{i+,i} \sigma_{P_{i+}} \sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}^2 + \sigma_{SH_{i+}}^2 / A_{i+}^2} = \\ &= \frac{A_i}{A_{i+}} (1 + \varepsilon_{i,i+}) = \frac{A_i}{A_{i+}} \frac{\sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}} \frac{R_{i+,i}}{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2 \sigma_{P_{i+}}^2}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$B_{i,i+} = \bar{S}_i(t) - A_{i,i+} \bar{S}_{i+}(t),$$

$$E_{i,i+}(t) = S_i(t) - A_{i,i+} S_{i+}(t) + B_{i,i+}, \quad (4)$$

где  $R_{i+,i}$  — коэффициент корреляции случайной величины — выборки  $T$  синхронных значений потоков —  $\{P_{i+}(t), P_i(t)\}_{t \in T}$ ,  $R_{i+,i} = R_{i,i+}$ ;

$\sigma_{P_i}^2$  и  $\sigma_{P_{i+}}^2$  — дисперсии потоков элементов  $i$  и  $i+$  на выборке  $T$ ;

$\sigma_{SH_i}^2$  и  $\sigma_{SH_{i+}}^2$  — дисперсии шума элементов.

Предполагается, что случайные величины — выборки шума, не зависимы от случайных величин — выборок соответствующих потоков  $\{SH_i(t)\}_{t \in T}$  от  $\{P_i(t)\}_{t \in T}$  и  $\{SH_{i+}(t)\}_{t \in T}$  от  $\{P_{i+}(t)\}_{t \in T}$ .

Выражения (1) и (3) определяют отношения чувствительностей соседних элементов, а (2) и (4) — относительные смещения. Отношения чувствительностей, например  $A_{i+,i}$ , равно истинному значению  $A_i / A_{i+}$ , умноженному на представленное в форме мультипликативной погрешности  $(1 + \varepsilon_{i+,i})$  выражение

$$\frac{\sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}} \frac{R_{i+,i}}{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2 \sigma_{P_{i+}}^2}} = \frac{\sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}} \frac{R_{i+,i}}{1 + \delta_{i+}}, \quad (5)$$

в свою очередь представленное произведением отношения отклонений потоков на отношение корреляции потоков к сумме единицы с отношением шум/сигнал, где шум представлен компонентой  $\sigma_{SH_{i+}}^2$ , а сигнал — интенсивность изменений сцены — компонентой  $A_{i+}^2 \sigma_{P_{i+}}^2$ .

При нулевом шуме, полной коррелированности потоков и одинаковой их интенсивности выражение (5) равно 1, тогда отношение интенсивностей равно истинному отношению чувствительностей элементов.

Рассмотрим, что можно сделать, чтобы уменьшить погрешность определения относительных чувствительностей.

Во-первых, в определении величин  $\sum_{t \in T} [\Delta S_i(t)]^2$  и  $\sum_{t \in T} [\Delta S_{i+}(t)]^2$  можно для уменьшения влияния шума вместо квадратов использовать произведения соседних отсчетов, т. е. на примере первой суммы

$$\sum_{t \in T} [\Delta S_i(t)] [\Delta S_i(t+1)] = A_i^2 \sigma_{P_i}^2 R_i(1),$$

где  $R_i(1)$  — автоковариация потоков соседних отсчетов  $i$ -го элемента.

Во-вторых, так как  $A_{i,i+}$  и  $A_{i+,i}$  по смыслу являются обратными по отношению друг к другу величинами, то в качестве оценки отношения чувствительностей можно взять величины  $0,5 \cdot (A_{i,i+} + 1/A_{i+,i})$  и  $0,5 \cdot (A_{i+,i} + 1/A_{i,i+})$ . Тогда выпишем выражение для  $A_{i+,i}$ , понимая под  $A_{i+,i}$  определяемую комбинацией  $0,5(A_{i+,i} + 1/A_{i,i+})$  величину,

$$\begin{aligned}
 A_{i+,i} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_{t \in T} \Delta S_{i+}(t) \Delta S_i(t)}{\sum_{t \in T} [S_i(t)]^2} + \frac{\sum_{t \in T} [\Delta S_{i+}(t)]^2}{\sum_{t \in T} \Delta S_{i+}(t) \Delta S_i(t)} \right] = \\
 &= \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{i+,i} \sigma_{P_{i+}} \sigma_{P_i}}{\sigma_{P_i}^2 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2}} + \frac{\sigma_{P_{i+}}^2 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2}}{R_{i+,i} \sigma_{P_{i+}} \sigma_{P_i}} \right] = \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} \times \\
 &\times \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{i+,i}}{\sigma_{SH_{i+}}^2} + \frac{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2 \sigma_{P_{i+}}^2}}{R_{i+,i}} \right] = \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} \times \\
 &\times \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{i+,i}}{1 + \delta_i} + \frac{1 + \delta_{i+}}{R_{i+,i}} \right] = \frac{A_{i+}}{A_i} \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} (1 + \rho_{i+,i}), \quad (6)
 \end{aligned}$$

где через  $(1 + \rho_{i+,i})$  представлено выражение  $\frac{1}{2} \left[ \frac{R_{i+,i}}{1 + \delta_i} + \frac{1 + \delta_{i+}}{R_{i+,i}} \right] \cdot \rho_{i+,i}$  назовем шумовой межэлементной погрешностью.

Покажем, что использование "двухитерационной" формулы (6) в среднем дает лучший результат, чем "одноитерационная" формула (1).

Формула применяется на множестве парных связей  $\{i,i+\}$ , и, сопоставляя среднее значение для (5) по этому множеству со средним значением (3) — результат сопоставления вычисляется на множестве пар значений двух случайных величин  $\delta_i$  и  $\delta_{i+}$ , значения которых определяют в свою очередь значения шести случайных величин:  $\sigma_{SH_i}^2$ ,  $A_i^2$ ,  $\sigma_{P_i}^2$ ,  $\sigma_{SH_{i+}}^2$ ,  $A_{i+}^2$ ,  $\sigma_{P_{i+}}^2$ , средние случайных величин  $\delta_i$  и  $\delta_{i+}$  равны между собой и это значение обозначено  $\delta$ . Можно видеть, что величина  $R/(1+\delta)$  находится дальше от единицы, чем  $0,5[R/(1+\delta) + (1+\delta)/R]$ , причем близость стала пропорциональ-

на  $\delta^2$  —  $\rho$  (просто  $\delta$ ); рассматриваются  $\delta < 1$  (средний шум меньше среднего изменения потока),  $R$  — среднее значение случайной величины  $R_{i+,i}$ .

Это справедливо, так как средние значения для (3) и (6) можно заменить функциональной зависимостью от средних случайных величин  $\sigma_{SH_i}^2$ ,  $A_i^2$ ,

$\sigma_{P_i}^2$ ,  $\sigma_{SH_{i+}}^2$ ,  $A_{i+}^2$ ,  $\sigma_{P_{i+}}^2$  в соответствии с теоремой

Слущкого — следствием центральной предельной теоремы, что позволяет заменять среднее значение функции случайных величин, при ограниченности средних и дисперсий этих случайных величин (должны быть меньше бесконечности) на функцию от средних этих случайных величин. Величины  $\sigma_{SH_i}^2$ ,  $A_i^2$ ,  $\sigma_{P_i}^2$ ,  $\sigma_{SH_{i+}}^2$ ,  $A_{i+}^2$ ,  $\sigma_{P_{i+}}^2$  удовлетворяют условиям теоремы Слущкого

Отметим, что как в (3), так и в (6) точность определяется множителем  $\sigma_{P_{i+}}/\sigma_{P_i}$ . Рассматривая "трехитерационные" и другие формулы, получаем формулу вида (для среднего отношения чувствительностей)

$$\begin{aligned}
 &\cdot \left[ \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1+\delta} + \frac{1+\delta}{R} \right) + \frac{1}{\frac{1}{2} \left( \frac{1+\delta}{R} + \frac{R}{1+\delta} \right)} \right] + \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1+\delta} + \frac{1+\delta}{R} \right) + \frac{1}{\frac{1}{2} \left( \frac{1+\delta}{R} + \frac{R}{1+\delta} \right)} \right]} \right],
 \end{aligned}$$

которая сходится к единице с увеличением числа итераций. Эта формула фрактального типа, образующий фрактала (так его назовем) выражается как

$$\frac{1}{2} \left( \frac{R}{1+\delta} + \frac{1+\delta}{R} \right).$$

Аттрактор фрактала — устойчивое состояние равен единице.

Основной вывод по определению относительных чувствительностей состоит в том, что потенциальная (максимальная) точность вычисления относительной чувствительности определяется отношением отклонений потоков на соседних элементах и не зависит от мощности шума, если отклонение последнего меньше отклонения потоков.

Рассмотрим оценки точности для двухитерационной формулы, считая ее разумным компромиссом уточнения, оценим зависимость точности

определения чувствительности от отклонений потока, разности потоков на соседних элементах (от корреляции) и шумов.

С увеличением интервала  $T$  — параметра статистической обработки — величины  $A_{i,i+}$  сходятся к

$$\frac{A_i}{A_{i+}}(1 + \varepsilon_{i,i+}) = \frac{A_i}{A_{i+}} \times \left[ \frac{\sigma_{P_{i,i+}}^2 - \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2}{2(\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \sigma_{EP_{i+}}^2 + 0,5(\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2))} + \frac{\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \sigma_{EP_i}^2 - 0,5(\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2)}{2(\sigma_{P_{i,i+}}^2 - \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2)} \right] = \frac{A_i}{A_{i+}} \times \left\{ 1 + \left[ \sigma_{P_{i,i+}}^2 (\sigma_{EP_i}^2 - \sigma_{EP_{i+}}^2) + \sigma_{P_{i,i+}}^2 (\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2) + 4 \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^4 + \Delta\sigma_{P_{i,i+1}}^2 (3\sigma_{EP_{i+}}^2 + \sigma_{EP_i}^2) \right] / 2 \left[ \sigma_{P_{i,i+}}^2 + \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \sigma_{EP_{i+}}^2 + 0,5(\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2) \right] (\sigma_{P_{i,i+}}^2 - \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2) + \frac{1,5\Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2 (\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2) - 0,25(\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2)^2 + \sigma_{EP_i}^2 \sigma_{EP_{i+}}^2}{2 \left[ \sigma_{P_{i,i+}}^2 + \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2 + \sigma_{EP_{i+}}^2 + 0,5(\sigma_{P_i}^2 - \sigma_{P_{i+}}^2) \right] (\sigma_{P_{i,i+}}^2 - \Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2)} \right\}$$

где  $\varepsilon_{i,i+}$  — погрешность величины  $A_{i,i+}$  относительно величины  $A_i / A_{i+}$ ;

$\sigma_{P_{i,i+}}^2$  — дисперсия полусуммы потоков  $i$ -го и  $(i+)$ -го элементов;

$\Delta\sigma_{P_{i,i+}}^2$  — дисперсия полуразности потоков  $i$ -го и  $(i+)$ -го элементов;

$\sigma_{EP_i}^2$  — дисперсия потока, эквивалентного шуму  $i$ -го элемента;

$\sigma_{P_{i,i+}}^2$  — дисперсия потока, эквивалентного шуму  $(i+)$ -го элемента;

$\sigma_{P_i}^2$  и  $\sigma_{P_{i+}}^2$  — дисперсии потоков, соответственно,  $i$ -го и  $(i+)$ -го элементов.

Величины  $B_{i,i+}$  с увеличением интервала  $T$  сходятся к величине

$$B_i - (A_i / A_{i+})(1 + \varepsilon_{i,i+})B_{i+} + A_i[\bar{P}_i(t) - \bar{P}_{i+}(t)] + A_i P_{i+} \varepsilon_{i,i+}, \quad (7)$$

где  $A_i$  и  $A_{i+}$  — чувствительности соседних,  $i$ -го и  $(i+)$ -го элементов;

$\bar{P}_i(t)$  и  $\bar{P}_{i+}(t)$  — средние значения потоков, соответственно,  $i$ -го и  $(i+)$ -го элементов.

Выражение, точно связывающее  $B_i$  и  $B_{i+}$ , это  $B_i - (A_i / A_{i+})B_{i+}$ , остальное в (7) относится к погрешности.

## Определение корректирующих коэффициентов и корректирование

### Общие положения

Определение корректирующих коэффициентов требует накопления сигналов сцены за некоторый интервал времени  $T$  — назовем интервалом накопления, и корректирование начинается, естественно, с момента первого определения корректирующих коэффициентов.

Формально корректирование записывается в виде

$$S_{n,m}^K(t) = (S_{n,m}(t) - B_{n,m})A_{n,m}^K = S_{n,m}(t)A_{n,m}^K + B_{n,m}^K,$$

где  $t = T + 1, T + 2, \dots$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_L$ ;  $m = 1, 2, \dots$ ;  $S_{n,m}^K(t)$  — скорректированный сигнал;  $S_{n,m}(t)$  — сигнал до коррекции;

$B_{n,m}^K$  и  $A_{n,m}^K$  — корректирующие коэффициенты ( $n, m$ )-элемента по смещению и усилению, соответственно.

По смыслу эти коэффициенты соответствуют оценкам смещения и чувствительности элементов, формируемым в процессе определения корректирующих коэффициентов:

$$B_{n,m}^K = -B_{n,m}A_{n,m}^K,$$

$$B_{n,m}^K = B_{n,m} \quad \text{— оценка смещения } (n,m) \text{ элемента;}$$

$$A_{n,m}^K = 1/A_{n,m} \quad \text{— величина, обратная оценке чувствительности } (n,m) \text{ элемента.}$$

Корректирование по смещению и усилению осуществляется, если статистика сцены (ее изменчивость) позволяет получить оценки и смещения, а также усиления элемента. При недостаточной изменчивости статистики, по части или всем элементам, для элементов с недостаточной статистикой возможно определение только одного корректирующего коэффициента.

### Этапы определения корректирующих коэффициентов

Каждое определение корректирующих коэффициентов содержит последовательность этапов:

накопление элементных и межэлементных сигнальных сумм;

определение состояния элементов ФПУ и межэлементных связей;

определение отношений чувствительностей и относительных смещений соседних элементов ФПУ;

формирование корректирующих коэффициентов элементов ФПУ.

Накопление элементных и межэлементных сумм осуществляется для каждого элемента и связей соседних элементов в течение интервала накопления  $T$ , начиная с некоторого момента  $(\tau - T + 1)$  — начала процедуры очередного определения корректирующих коэффициентов элементов ФПУ. Параметр  $\tau$  характеризует моменты завершения очередных накоплений сигнальных сумм и вычисления корректирующих коэффициентов.

В состав этих сумм, необходимых для выполнения остальных этапов, входят суммы:

$$\frac{1}{T} \sum_{t=\tau-T+1}^{\tau} S_{n,m}(t) = \bar{S}_{n,m}(\tau) \text{ — среднее значение}$$

сигнала элемента на интервале  $(\tau - T + 1, \tau)$ ;

$$\frac{1}{T} \sum_{t=\tau-T+1}^{\tau} [S_{n,m}(t) - \bar{S}_{n,m}(\tau)]^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=\tau-T+1}^{\tau} S_{n,m}^2(t) -$$

$-\bar{S}_{n,m}^2(\tau)$  — дисперсия сигнала элемента;

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \sum_{t=\tau-T+1}^{\tau} [S_{n,m}(t) - \bar{S}_{n,m}(\tau)][S_{n+,m+}(t) - \bar{S}_{n+,m+}(\tau)] = \\ & = \frac{1}{T} \sum_{t=\tau-T+1}^{\tau} S_{n,m}(t)S_{n+,m+}(t) - \bar{S}_{n,m}(\tau)\bar{S}_{n+,m+}(\tau) = \end{aligned}$$

$= \sigma_{S_{n,m}/n+m+}^2$  — ковариация сигналов соседних

элементов:  $(n,m)$ -элемента и  $(n+,m+)$ -элемента, и ряд других сумм, которые определим ниже при описании последующих этапов.

Накопление обеспечивает получение сумм естественным способом — в темпе поступления сигналов от элементов ФПУ. Добавив к каждой сумме накопитель предшествующих (на  $T$  отсчетов ранее) сигналов, получим возможность скользящего суммирования при перекрывающихся интервалах оценивания, но неизбежной платой за это расширение возможностей будет увеличение потребного объема памяти.

Последующий после накопления сумм этап — определение состояния элементов ФПУ и межэлементных связей — обеспечивает оценку каждого из элементов на предмет дефектности и пригодности для двухточечной или одноточечной калибровки и возможности использования его связей с соседними элементами при последующем определении корректирующих коэффициентов.

На следующих этапах определяют межэлементные характеристики — относительные чувствительности и смещения элементов и по ним с учетом состояния элементов и их связей — корректирующие коэффициенты.

### Определение состояния элементов и их связей

Состояние элемента показывает, дефектен ли он или нет, и если нет, зафиксированы ли на нем в период последнего оценивания изменения сцены, достаточные для оценивания отношений его чувствительности к чувствительности соседних элементов и относительных смещений. Элемент может находиться в трех состояниях:

- 2 — на элементе зафиксированы изменения сцены, элемент недефектный (пригоден для двухточечной калибровки по чувствительности и смещению);
- 1 — на элементе не зафиксированы изменения сцены, элемент недефектный (пригоден для одноточечной калибровки);
- 0 — элемент дефектный, его сигналы после корректирования заменяются сигналами соседних недефектных элементов.

Обнаружение наличия изменений сцены (изменения потока) на элементе осуществляется по автоковариации сигналов соседних отсчетов элемента

$$\begin{aligned} \sigma_{S_{n,m}}^2 = & \frac{1}{T-1} \sum_{t=\tau-T+2}^{\tau} [S_{n,m}(t) - \bar{S}_{n,m}(\tau)] \times \\ & \times [S_{n,m}(t-1) - \bar{S}_{n,m}(\tau)], \end{aligned} \quad (8)$$

которая при независимом шуме элемента (независимом по отсчетам и с потоком сцены) с увеличением  $T$  сходится к  $A_{n,m}^2 \sigma_{P_{n,m}}^2(1)$ ,

где  $A_{n,m}$  — коэффициент усиления элемента;

$\sigma_{P_{n,m}}^2(1)$  — автоковариация потока элемента

(со сдвигом во времени на один отсчет).

Элементы с автоковариациями больше некоторого задаваемого уровня, который определим как уровень значимых изменений сцены на элементе, относятся к пригодным для 2-калибровки (двухточечной калибровки), остальные — к 1-калибровке (одноточечной калибровки).

Критерий наличия изменений сцены (8) работает для независимого шума. Для коррелированного шума критерий должен быть усложнен — с просто автоковариационного коэффициента на автоковариационную функцию.

Технологичность формирования суммы (8) обеспечивается ее представлением в виде разности накопительной суммы произведений отсчетов сигналов и произведения матожиданий

$$\begin{aligned} \sigma_{S_{n,m}}^2 = & \frac{1}{T-1} \sum_{t=\tau-T+2}^{\tau} S_{n,m}(t)S_{n,m}(t-1) - \\ & - \bar{S}_{n,m}(\tau)\bar{S}_{n,m}(\tau). \end{aligned}$$



Обнаружение дефектов элементов при оценке шума осуществляют по дисперсии разности соседних по времени отсчетов элемента

$$\sigma_{dS_{n,m}}^2(1) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=\tau-T+2}^{\tau} [S_{n,m}(t) - S_{n,m}(t-1)]^2,$$

сходящейся (при независимом шуме) к величине

$$2\sigma_{SH_{n,m}}^2 + 2A_{n,m}^2[\sigma_{P_{n,m}}^2 - \sigma_{P_{n,m}}^2(1)],$$

где  $\sigma_{SH_{n,m}}^2$  — дисперсия шума элемента;

$\sigma_{P_{n,m}}^2$  — дисперсия потока элемента;

$\sigma_{P_{n,m}}^2(1)$  — автоковариация потока элемента (со сдвигом во времени на 1 отсчет).

Элементы с  $\sigma_{dS_{n,m}}^2(1)$ , превышающие среднее по элементам значение этой дисперсии на некоторую величину (или в некоторое количество раз), которую определим как порог дефектности элементов по шуму, относятся к дефектным. Косвенное обнаружение дефектов элементов, в явном виде учитываемое как дефекты связей между элементами, осуществляется по отношению чувствительностей  $A_{n,m/n+,m+}$  соседних элементов  $(n,m)$  и  $(n+,m+)$ . Если  $A_{n,m/n+,m+}$  больше некоторого значения  $\max A/A$  — допустимый верхний уровень отношений чувствительности элементов, и меньше  $\min A/A$  — нижний уровень, то связь этих элементов помечается как недоступная для последующего процесса определения их корректирующих коэффициентов. Как дефектные помечаются и связи дефектных элементов, эти дефекты могут совпадать с "дефектами"  $A_{n,m/n+,m+}$ .

### Определение отношений чувствительностей и относительных смещений соседних элементов ФПУ

Отношения чувствительностей и относительные смещения определяются для бездефектных связей соседних элементов и являются исходной информацией для формирования корректирующих коэффициентов.

Для матричного ФПУ отношения чувствительностей и относительные смещения соседних элементов  $(n,m)$  и  $(n+,m+)$  определяют из линейной регрессии выборки отсчетов сигналов  $S_{n,m}(t)$ ,  $t \in T$  ( $t = \tau - T + 1, \tau - T + 2, \dots, \tau$ ) по выборке  $S_{n+,m+}(t)$ ,  $t \in T$  и линейной регрессии отсчетов  $S_{n+,m+}(t)$  по  $S_{n,m}(t)$ ,

$$A_{n,m/n+,m+} = \frac{1}{2} \times$$

$$\times \left[ \frac{\sum_{t \in T} \Delta S_{n,m}(t) \Delta S_{n+,m+}(t)}{\sum_{t \in T} \Delta S_{n+,m+}^2(t)} + \frac{\sum_{t \in T} \Delta S_{n,m}^2(t)}{\sum_{t \in T} \Delta S_{n,m}(t) \Delta S_{n+,m+}(t)} \right], \quad (9)$$

$$B_{n,m/n+,m+} = \bar{S}_{n,m}(\tau) - A_{n,m/n+,m+} \bar{S}_{n+,m+}(\tau), \quad (10)$$

где  $A_{n,m/n+,m+}$  — отношение чувствительности  $(n,m)$ -го элемента к чувствительности соседнего,  $(n+,m+)$ -го элемента;

$$\begin{aligned} \Delta S_{n,m}(t) &= S_{n,m}(t) - \bar{S}_{n,m}(\tau), \quad \Delta S_{n+,m+}(t) = \\ &= S_{n+,m+}(t) - \bar{S}_{n+,m+}(\tau), \end{aligned}$$

$\bar{S}_{n,m}(\tau)$  и  $\bar{S}_{n+,m+}(\tau)$  — средние значения сигналов соседних  $(n,m)$ -го и  $(n+,m+)$ -го элементов, определенные на интервале  $T$ ;

$B_{n,m/n+,m+}$  — относительное смещение.

При независимом шуме с увеличением интервала  $T$  величины  $B_{n,m/n+,m+}$  сходятся к величинам

$$\begin{aligned} B_{n,m} - (A_{n,m} / A_{n+,m+})(1 + \varepsilon_{n,m/n+,m+}) \times \\ \times B_{n+,m+} + A_{n,m} [\bar{P}_{n,m}(\tau) - \bar{P}_{n+,m+}(\tau)] + \\ + A_{n,m} \bar{P}_{n+,m+}(\tau) \varepsilon_{n,m/n+,m+}, \end{aligned}$$

где  $A_{n,m}$  и  $A_{n+,m+}$  — чувствительности соседних  $(n,m)$ -го и  $(n+,m+)$ -го элементов;

$\bar{P}_{n,m}(\tau)$  и  $\bar{P}_{n+,m+}(\tau)$  — средние значения потоков этих элементов,

а величины  $A_{n,m/n+,m+}$  сходятся к величинам

$$\frac{A_i}{A_{i+1}} (1 + \varepsilon_{n,m/n+,m+}),$$

где  $\varepsilon_{n,m/n+,m+}$  — погрешность величины  $A_{n,m/n+,m+}$  относительно величины  $A_{n,m} / A_{n+,m+}$  рассмотрена выше.

В качестве варианта для снижения погрешности  $\varepsilon_{n,m/n+,m+}$  сумму (9) можно модифицировать — квадраты величин  $\Delta S_{n,m}^2(t)$  и  $\Delta S_{n+,m+}^2(t)$  заменить, соответственно, на  $\Delta S_{n,m}(t) \Delta S_{n,m}(t+1)$  и  $\Delta S_{n+,m+}(t) \Delta S_{n+,m+}(t+1)$ . Погрешность при этом снижается за счет симметризации слагаемых суммы (9) — смещения знаменателя первой суммы и числителя второй (компоненты дисперсии шума) стремятся к нулю.

Для линейчатых ФПУ отношения чувствительностей и относительные смещения соседних элементов определяют с использованием тех же формул (9), (10), что и для матричных и также с модификацией суммы (9). Отличие состоит в выборке отсчетов для сопоставляемых элементов — для матричных ФПУ берут подряд  $T$  отсчетов по каждому элементу, а для линейчатых — в зависимости от того, в каких строках находятся сопоставляемые элементы.

Если оба элемента находятся в одной и той же строке ФПУ, то как и для матричных ФПУ берут подряд  $T$  отсчетов этих элементов и применяют модифицированную формулу (9). Если они находятся в соседних строках, то в случае, если сканер работает в режиме со сдвигом на четном ходу вниз, для элемента верхней строки в выборку включают отсчеты нечетных ходов сканера, а для элемента нижней строки — четных ходов сканера. Если сканер работает с другой фазой — для элемента верхней строки в выборку включают отсчеты четных ходов сканера, элемента нижней строки — нечетных ходов сканера. При этом вопрос, применять ли модифицированную формулу (9), остается открытым — ответ на него может дать моделирование при сценах различной изменчивости во времени (сцен с различным темпом изменений). Для крайнего случая — неизменной ("стоячей") во времени сцены, модифицированная формула даст лучший результат. Для другой крайней альтернативы — быстро меняющейся сцены — лучше немодифицированная формула.

### Формирование корректирующих коэффициентов

Корректирующие коэффициенты определяют для недефектных элементов: отдельно для элементов, пригодных для 1-калибровки (обозначим их 1-элементами), и отдельно — для элементов, пригодных для 2-калибровки (2-элементов). Для 2-элементов при определенных условиях — при их изоляции (1-элементами и/или дефектами) от элемента, от которого начинается формирование корректирующих коэффициентов, вынужденной мерой будет 1-калибровка.

Начало процесса определения корректирующих коэффициентов — из 2-элементов выбирают произвольный элемент в центре ФПУ (поблизости, если элемент в центре дефектный и/или связи его дефектные), относительно которого будут корректировать (выравнивать) сигналы остальных элементов, пригодных для калибровки. Элемент помечают как нулевой — его сигналы не корректируются, остаются неизменными, формально это означает, что  $B_{n_0, m_0}^k$  и  $A_{n_0, m_0}^k$  — корректирующие коэффициенты нулевого элемента

равны, соответственно, нулю и единице. Для надежности выбора нулевого элемента можно ввести условие бездефектности и окрестности этого элемента.

Корректирующие коэффициенты 1-элементов определяют сопоставлением нулевого элемента с каждым из множества 1-элементов; корректирующие коэффициенты для 2-элементов — с использованием межэлементных связей, информации по 2-элементам и их недефектным связям.

Определение начинается с соседей нулевого элемента, используя установленные для нулевого элемента значения  $B_{n_0, m_0}^k = 0$  и  $A_{n_0, m_0}^k = 1$  и отношения чувствительностей и относительные смещения нулевого элемента с соседними.

Таким же образом находят корректирующие коэффициенты этих соседних элементов. Далее процедура повторяется — по определенным элементам и по их связям с неопределенными соседями находят корректирующие коэффициенты этих соседей, и так продолжают до определения всех элементов.

Так как для определения корректирующих коэффициентов 2-элементов необходима непрерывная связанность элементов, с "двухточечной" информацией в связях (по чувствительностям и смещениям), то множество 2-элементов должно быть непрерывным — из нулевого должна существовать обеспеченная 2-информацией непрерывная цепочка соседних элементов (сосед—связь—сосед) в любой элемент 2-множества элементов. Если это условие не выполняется, существуют локальные — "оторванные" от нулевого 2-элементы. Для локальных групп 2-элементов, равно как и для 1-элементов, выполняется процедура 1-калибровки. Хотя для "оторванного" — от нулевого элемента множества 2-элементов можно провести локальную 2-калибровку, неясно — как дальше работать с локально выровненными данными (вопрос требует дополнительного рассмотрения).

Процедура 1-калибровки в отличие от 2-калибровки не является цепочечной, здесь в определении корректирующего коэффициента участвуют характеристики только элементов нулевого и того, для которого определяется корректирующий коэффициент.

### Заключение

Разработан новый адаптивный метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств (матричных и многорядных, работающих в режиме временной задержки и накопления сигналов), не требующий применения калиброванных источников оптического излучения. Для вычисления корректирующих коэффициентов используют сигналы сцены, при этом не требуются априорные предположения о характере

наблюдаемой сцены. По сигналам, получаемым при регистрации сцены, определяют межэлементные связи неоднородности соседних элементов, а затем корректирующие коэффициенты для всех элементов, обеспечивающие устранение неоднородности чувствительности и постоянной составляющей выходных сигналов. Корректировку производят в динамическом диапазоне сигналов, регистрируемых фотоприемным устройством. Метод предполагает применение одноточечной, двухточечной и нелинейной схем. Показано, что результат коррекции зависит от сцены и от дефектности элементов, предложены алгоритмы обработки с комбинированием различных схем.

Метод подробно проанализирован для случая линейной модели. Показано, что существует способ определения отношений чувствительностей соседних элементов, оценка качества которого не зависит от шума, а зависит только от отношения средних отклонений потока сцены. Показано, что условием точного корректирования является межэлементное равенство средних потоков и средних отклонений сцены.

Работа выполнена в рамках  
научно-исследовательской работы по гранту  
Президента Российской Федерации  
для государственной поддержки ведущих  
научных школ Российской Федерации НШ-3289.2006.9.

## Л и т е р а т у р а

1. Perry David L., Dereniak Eustase L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors// Optical engineering, August 1993. V. 32. № 8. P. 1854—1859.
2. Cheung Lizzie, Dereniak Eustase L., Perry David L. Computer simulation of spatial nonuniformity correction in a staring sensor// Proc. of SPIE. 1988. V. 972.
3. Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И. и др. Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из  $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$  формата 128×128// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 50—54.
4. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Бочков В. Д. и др. Тепловизионная камера на основе неохлаждаемых микроболометрических ФПУ// Там же. 2003. № 2. С. 102—106.
5. Пат. 2113065 РФ. Способ выравнивания неравномерной чувствительности фотоприемников сканирующих линеек тепловизоров/ В. М. Белоконев, Е. В. Дегтярев, И. В. Рудый и др.; Опубл. 10.06.98. Бюл. № 16.
6. Павлова В. А. и др. Иконический подход к решению проблемы коррекции неоднородностей чувствительности многоэлементных МФПУ в сканирующих тепловизорах// Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2.
7. Ratliff Bradley M., Hayat Majeed M., Tyo J. Scott. Algorithm for radiometrically-accurate nonuniformity correction with arbitrary scene motion// Proc. of SPIE. 2003. V. 5076.
8. Torres Sergio N., Vera Esteban M., Reeves Rodrigo A., Sobarzo Sergio K. Adaptive Scene-Based Non-Uniformity Correction Method for Infrared-Focal Plane Arrays// Ibid.
9. Уиндрю Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989.

Статья поступила в редакцию 29 мая 2007 г.

## FPA nonuniformity correction method based on signals from observed scene

V. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, L. D. Saginov, A. M. Filachev,  
K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. N. Sviridov  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The method for FPA non-uniformity correction (NUC) without use of calibration sources of homogeneous radiation is considered. The offered method solves a problem of elimination of heterogeneity of signals because of distinctions of sensitivity of separate photosensitive FPA elements. For definition of non-uniformity correction coefficients signals of an observed scene are used and for each photosensitive element the pair adjusting coefficients on displacement and sensitivity is determined. Process of correction consists in periodically carried out procedure of definition of adjusting factors and continuously carried out procedure of signals correcting. The method is based on that at scanning the image in a case of linear TDI or at movement of objects of a scene in case of staring FPA, the same elements of a scene are sequentially registered by the neighbors photosensitive elements. On parametrical dependence of signals of the neighbors elements at sequentially registration of elements of a scene with various intensity of radiation it is possible to determine relative shifts of levels and relative sensitivity of the adjacent photosensitive elements. Applying recurrent procedure, it is possible to determine non-uniformity correction coefficients for all FPA elements. Ways of technical realization of a method are considered and settlement expressions for definition of adjusting factors are received. The factors determining accuracy of a method was analyzed.*