

УДК 621.384.3

Метод коррекции неоднородности по сигналам сцены многоэлементных фотоприемных устройств с микросканированием

В. Н. Соляков, С. И. Жегалов, В. Г. Морозова

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

Рассмотрен метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств с микросканированием, в котором корректирующие коэффициенты определены через связи неоднородности соседних элементов фотоприемного устройства (ФПУ), выявляемые по сигналам сцены. Эффект микросканирования используется для точного сопоставления сигналов соседних элементов. По связям соседних элементов устанавливаются связи всех элементов, по которым находятся корректирующие коэффициенты и производится корректирование.

PACS: 85.60.-q

Введение

Предлагаемый метод относится к оптико-электронным системам обработки изображений и

решает актуальную для этих систем задачу устранения неоднородности сигналов, обусловленную различиями в чувствительности к входному потоку элементов ФПУ.

Исходным для рассматриваемого является метод коррекции [1], который видоизменяется применительно к ФПУ с микросканированием. Изложение ведем по той же схеме, что и в работе [1], но с упором на аспекты микросканирования.

Конструктивной основой предлагаемого метода, как и в [1], является идея определения корректирующих коэффициентов через межэлементные связи ФПУ, выявляемые по сигналам сцены.

Понятие "межэлементная связь" содержит два аспекта: связи соседних элементов и связи любых, удаленных один от другого, элементов.

Исходным этапом является оценка связей соседних, по которым далее определяются связи между любыми элементами.

Основанием для оценивания связей соседних элементов является то, что любая осмысленная сцена всегда содержит информационные связи между соседними участками этой сцены и, значит, эти связи могут быть выявлены.

Точность оценки межэлементных связей и точность коррекции зависят от сцены: чем однороднее поток по элементам, тем точнее коррекция. Это может быть достигнуто на большом интервале за счет усреднения множества различных сцен.

Микросканирование позволяет решить задачу однородности потоков на более коротком интервале усреднения — при микросканировании на соседние элементы ФПУ попадают частично или полностью потоки одних и тех же элементов сцены, с другой стороны, на один и тот же элемент попадают соседние элементы сцены. Это дает возможность сравнительно точно сопоставить сигналы соседних элементов посредством аппроксимации градиента потока на этих элементах.

- Для сканирующих ФПУ микросканированием следует считать сдвиги изображения со сканера относительно линейки элементов ФПУ обычно на половину элемента (пиксела) или, возможно, на элемент — при каждом четном скане. Сдвиг на полэлемента используется для повышения вдвое пространственного разрешения.

- Для матричных ("смотрящих") ФПУ микросканирование представлено в работе [2]. Траекторией сдвигов, распространенной на практике, является четырехпозиционная траектория: исходное положение, вправо на 1/2 пиксела (элемента матрицы), вниз на 1/2 пиксела, влево на 1/2 пиксела, вверх на 1/2 пиксела, т. е. в исходное положение. В работе [2] приведена схема реализации такой траектории.

В [3] исследуется метод микросканирования при коррекции неоднородности тепловизионных приемников. В отличие от [3] в нашем методе качество коррекции не зависит от числа элементов и отношения сигнал/шум при уровне шума, мень-

шем уровня изменений сцены на элементах. Первое достигается разветвленностью обхода элементов матрицы (линейки — для сканирующего ФПУ) при формировании корректирующих коэффициентов, второе — статистическим характером метода.

Следует отметить метод [4] для коррекции по смещению, использующий микросканирование, в нашем же случае рассмотрена более общая, двухпараметрическая коррекция (и по чувствительности, и по смещению).

Такие вопросы как определение дефектов, их "обход", учет особенностей топологии сканирующих линеек и матриц при определении корректирующих коэффициентов в статье не рассматриваются, но проработка метода осуществлена и в этом плане, практически он апробирован на реальных данных сканирующего устройства 4×288 с учетом дефектов, необходимости сопоставления двух- и однопараметрической коррекции и показал свою работоспособность [5].

Парные связи элементов ФПУ

Обозначать соседние элементы n , m по отношению к некоторому элементу 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 -й элемент в общем виде будем записывать как $i+$ без указания — какой из нескольких соседей конкретно рассматривается.

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 как $i+$;

$P_i(t)$ и $P_{i+}(t)$ — потоки на элементах в момент t ;

A_i и A_{i+} — чувствительности элементов;

B_i и B_{i+} — смещения;

$SH_i(t)$ и $SH_{i+}(t)$ — шум (временной) элементов.

Выпишем линейные регрессии между сигналами этих элементов

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

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

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:

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

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

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

$$A_{i,i+} = \frac{A_i}{A_{i+}} \cdot \frac{\sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}} \cdot \frac{R_{i+,i}}{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2 \cdot \sigma_{P_{i+}}^2}}; \quad (3)$$

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

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

где $R_{i+,i}$ — коэффициент корреляции потоков-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 независимы от случайных величин, т. е. 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

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

являющееся 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 $A_{i+}^2 \cdot \sigma_{P_{i+}}^2$.

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 для уменьшения погрешности определения относительных чувствительностей.

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 $0,5 \cdot (A_{i+,i} + 1/A_{i+,i})$ величину,

$$A_{i+,i} = \frac{A_{i+}}{A_i} \cdot \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} \cdot \frac{1}{2} \times \left[\frac{R_{i+,i}}{1 + \frac{\sigma_{SH_i}^2}{A_i^2 \cdot \sigma_{P_i}^2}} + \frac{1 + \frac{\sigma_{SH_{i+}}^2}{A_{i+}^2 \cdot \sigma_{P_{i+}}^2}}{R_{i+,i}} \right] = \frac{A_{i+}}{A_i} \cdot \frac{\sigma_{P_{i+}}}{\sigma_{P_i}} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{R_{i+,i}}{1 + \delta_i} + \frac{1 + \delta_{i+}}{R_{i+,i}} \right]. \quad (6)$$

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

Но, как следует из (6), это мероприятие повышения точности не коснулось множителя $\frac{\sigma_{P_i}}{\sigma_{P_{i+}}}$,

который также желательно стремиться к единице.

Это может обеспечить микросканирование, т. е. позволяет для каждой пары сопоставляемых отсчетов соседних элементов так модифицировать (подправить) эти отсчеты, что потоковые составляющие в модифицированных отсчетах будут близки, а значит, и среднеквадратические отклонения этих составляющих будут близки друг к другу.

Перед тем как детально исследовать микросканирование для улучшения оценок связей соседних элементов, приведем соображения об оценках $B_{i+,i}$.

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

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

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 $B_i - (A_i / A_{i+}) \cdot B_{i+}$, остальное в (7) относится к погрешности.

Очевидно, что сближение потоков соседних элементов будут стремить (7) к выражению точной связи B_i и B_{i+} , так как будет снижаться $\varepsilon_{i,i+}$, что следует из вышесказанного, а погрешность $A_i \cdot [\bar{P}_i(t) - \bar{P}_{i+}(t)]$ будет скомпенсирована градиентом потока.

Вначале формулы использования микросканирования приведем для сканирующего ФПУ, затем распространим их на матричные.

На рис. 1 показано соотношение потоков сцены и элементов линейки при работе со сдвигом сканера в полстроки. Предполагается, что за время между четным и нечетными ходами сканера сцена не меняется.

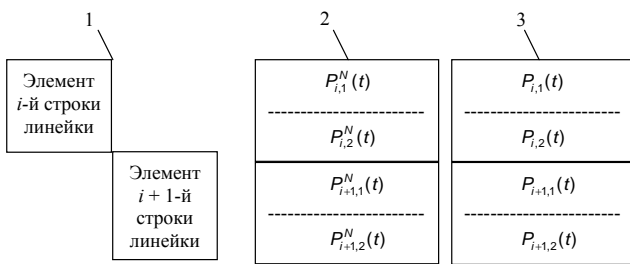


Рис. 1. Соотношение потоков сцены и элементов линейки при работе со сдвигом сканера в полстроки

На рис. 1 даны следующие обозначения:

1 — линейка ФПУ, для простоты рассмотрена однорядная линейка;

2 — сцена при нечетном ходе сканера;

3 — сцена при четном ходе сканера;

$P_{i,1}^N(t)$ и $P_{i,2}^N(t)$ — потоки, попадающие на верхние и нижние части элемента i -й строки линейки при нечетном ходе сканера;

$P_{i+1,1}^N(t)$ и $P_{i+1,2}^N(t)$ — потоки, попадающие на верхние и нижние части элементов $i+1$ -й строки линейки при нечетном ходе сканера;

$P_{i,1}(t)$ и $P_{i,2}(t)$ — потоки, попадающие на верхние и нижние части элементов i -й строки линейки при четном ходе сканера.

Из условия постоянства сцены между четным и нечетными ходами —

$$P_{i,1}(t) = P_{i,2}^N(t); \quad P_{i,2}(t) = P_{i+1,1}^N(t);$$

$P_{i+1,1}(t)$ и $P_{i+1,2}(t)$ — потоки, попадающие на верхние и нижние части элементов $i+1$ -й строки линейки при четном ходе сканера.

Также из условия постоянства сцены —

$$P_{i+1,1}(t) = P_{i+1,2}^N(t), \quad P_{i+1,2}(t) = P_{i+2,1}^N(t).$$

Потоки на соседних элементах линейки совпадают только частично — по нижней части i -го элемента при четном ходе и верхней части $i+1$ -го элемента — при нечетном.

Несовпадающие потоки хотя и близки, из-за коррелированности соседних участков сцены, и эта близость "работает" на качество коррекции, но это несовпадение играет ключевую роль в неточности корректирования, если усреднение осуществляется не по большому числу различных сцен или не используются эталонные сигналы.

Максимальная сопоставимость потоков соседних элементов достигается изменением сигналов четного хода по правилу

$$S_i^I(t) = S_i(t) + [S_i(t) - S_i^N(t)] = 2 \cdot S_i(t) - S_i^N(t), \quad (8)$$

где $S_i(t) = [P_{i,1}(t) + P_{i,2}(t)] \cdot A_i + B_i + SH_i(t) = [P_{i,2}^N(t) + P_{i+1,1}^N(t)] \cdot A_i + B_i + SH_i(t)$ — сигнал с i -го элемента при четном ходе;

$$S_i^N(t) = [P_{i,1}^N(t) + P_{i,2}^N(t)] \cdot A_i + B_i + SH_i^N(t) \quad \text{—}$$

сигнал с i -го элемента при нечетном ходе;

A_i — чувствительность i -го элемента;

B_i — смещение i -го элемента;

$SH_i^N(t)$, $SH_i(t)$ — шум при нечетном и четном ходах, соответственно.

Правило изменения основывается на том, что градиент потоков на соседних элементах ввиду его малости достаточно точно аппроксимируется линейной зависимостью. В результате потоковые составляющие в сигналах $S_i^I(t)$ и $S_{i+1}^N(t)$ становятся сопоставимыми, что несложно проверяется подстановкой линейно связанных компонент сцены на участке, накрывающем пару соседних элементов ФПУ.

Действительно, пусть

$$\bullet \quad P_{i,2}^N(t) = P_{i,1}^N(t) + \Delta; \quad P_{i+1,1}^N(t) = P_{i,1}^N(t) + 2 \cdot \Delta;$$

$$P_{i+1,2}^N(t) = P_{i,1}^N(t) + 3 \cdot \Delta,$$

тогда

$$\bullet \quad S_i^I(t) = 2 \cdot S_i(t) - S_i^N(t) = 2 \cdot [P_{i,1}(t) + P_{i,2}(t)] \times$$

$$\begin{aligned} & \times A_i + 2 \cdot B_i + 2 \cdot SH_i(t) - [P_{i,1}^N(t) + P_{i,2}^N(t)] - B_i - SH_i(t) = \\ & = A_i \cdot [P_{i,2}^N(t) + 2 \cdot P_{i+1,1}^N(t) - P_{i,1}^N(t)] + B_i + SH_i(t) = A_i \times \\ & \times [P_{i,1}^N(t) + \Delta + 2 \cdot [P_{i,1}^N(t) + 2 \cdot \Delta] - P_{i,1}^N(t)] + B_i + SH_i(t) = \\ & = A_i \cdot [2 \cdot P_{i,1}^N(t) + 5 \cdot \Delta] + B_i + SH_i(t); \\ & \bullet S_{i+1}^N(t) = A_{i+1} \cdot [P_{i+1,1}^N(t) + P_{i+1,2}^N(t)] + B_{i+1} + SH_{i+1}(t) = \\ & = A_{i+1} \cdot [P_{i,1}^N(t) + 3 \cdot \Delta + P_{i,1}^N(t) + 2 \cdot \Delta] + B_{i+1} + SH_{i+1}(t) = \\ & = A_{i+1} \cdot [2 \cdot P_{i,1}^N(t) + 5 \cdot \Delta] + B_{i+1} + SH_{i+1}(t). \end{aligned}$$

Так как метод статистический, то условие неизменности также рассматривается статистически в среднем. Неизменности сцены способствуют: наличие в сценах протяженных участков с маломеняющимися потоками; повышение частоты считывания сигнала с ФПУ; увеличение периода накопления — в рамках стационарности однородности.

Методика сравниваемых сигналов аналогичным образом распространяется на матричное микросканирование.

На рис. 2 приведены фазы сдвига сцены относительно элемента (пиксела) матрицы при микросканировании (показано изменение положения участка сцены размером в пиксел).

Фазы "0" и "1" (см. рис. 2) показывают, что рассматриваемый элемент матрицы и вышерасположенный элемент находятся в такой же связи, как и вышерассмотренная пара элементов линейки — фаза "1" соответствует сигналам четного хода, фаза "0" — нечетного, и к каждой паре соседних по вертикали элементов матрицы можно применить

вышеизложенную методику сопоставления элементов линейки.

Аналогично, фазы "3" и "0" обеспечат сопоставление для соседних по горизонтали пар элементов матрицы, т. е. все межэлементные связи (по вертикали и горизонтали) всех соседних элементов матрицы могут быть определены по измененным сигналам с сопоставимыми потоками.

Если через $S_{n,m}^{(0)}(t)$, $S_{n,m}^{(1)}(t)$, $S_{n,m}^{(2)}(t)$, $S_{n,m}^{(3)}(t)$ обозначим сигналы элемента матрицы, соответственно, фазам, — 0, 1, 2, 3 (каждому значению параметра t соответствуют четыре отсчета), то измененные сигналы для сопоставлений по вертикали и горизонтали запишутся, соответственно;

$$\begin{aligned} S_{n,m}^{IV}(t) &= 2 \cdot S_{n,m}^{(1)}(t) - S_{n,m}^{(0)}(t); \\ S_{n,m}^{IG}(t) &= 2 \cdot S_{n,m}^{(3)}(t) - S_{n,m}^{(0)}(t). \end{aligned}$$

Определение корректирующих коэффициентов и корректирование

Общие положения

Определение корректирующих коэффициентов требует накопления сигналов сцены за некоторый интервал времени T — интервал накопления, и корректирование начинается, естественно, с момента первого определения корректирующих коэффициентов. Формально корректирование записывается в виде:

$$S_{n,m}^K(t) = (S_{n,m}(t) - \hat{B}_{n,m}) \cdot A_{n,m}^K = S_{n,m}(t) \cdot A_{n,m}^K + B_{n,m}^K,$$

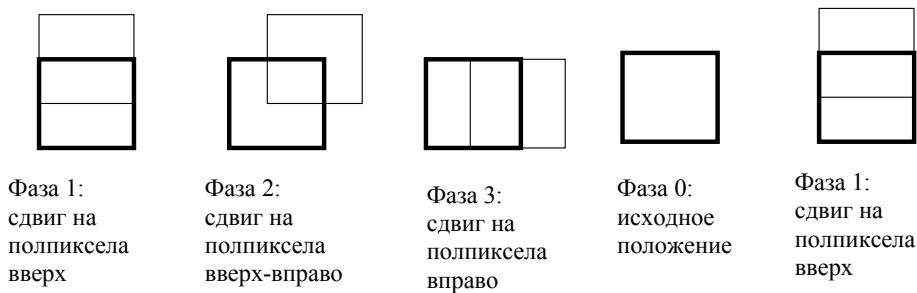


Рис. 2. Фазы сдвига сцены относительно элемента (пиксела) матрицы при микросканировании

сканировании. Жирным контуром обозначено положение элемента матрицы, тонким — сканируемые

$$\begin{aligned} & t = T + 1, T + 2, \dots; \\ & n = 1, 2, \dots, N_L; \quad m = 1, 2, \dots, M_L; \\ & S_{n,m}^K(t) \text{ — скорректированный сигнал;} \\ & S_{n,m}(t) \text{ — сигнал до коррекции;} \end{aligned}$$

$B_{n,m}^K$ и $A_{n,m}^K$ — корректирующие коэффициенты (n, m)-элемента по смещению и усилению, соответственно; N_L и M_L — размерность, соответственно, по вертикали и горизонтали линейки — для сканирующих ФПУ, или матрицы элементов — для матричного ФПУ.

Параметр t определяет отсчеты линейки (матрицы).

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 τ характеризует моменты завершения очередных накоплений сигнальных сумм и вычисления корректирующих коэффициентов.

Последующий после накопления сумм этап — определение состояния элементов ФПУ и межэлементных связей — обеспечивает оценку каждого из элементов на предмет дефектности и пригодности для двухточечной (2-элементы) или одноточечной (1-элементы) калибровки и возможности использования его связей с соседними элементами при последующем определении корректирующих коэффициентов.

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

Определение отношений чувствительностей и относительных смещений соседних элементов ФПУ

Отношения чувствительностей и относительные смещения соседних элементов (n, m) и ($n+, m+$) определяются 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 $S_{n,m}(t)$,

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

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

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

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

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

$\bar{S}_{n,m}(\tau)$ 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.

В качестве $S_{n+,m+}(t)$ берутся исправленные в соответствии с (8) последовательности сигналов.

Формирование корректирующих коэффициентов

Общие положения

Корректирующие коэффициенты определяются для недефектных 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.

Процесс определения корректирующих коэффициентов начинается с того, что из 2-элементов (или 1-элементов, если 2-элементов не имеется) выбирается произвольный элемент в центре ФПУ (поблизости — если элемент в центре дефектный и/или связи его дефектные), относительно которого будут корректироваться (выравниваться) сигналы остальных элементов, пригодных для калибровки. Элемент помечают как нулевой — его сигналы не корректируются, остаются неизменными.

Определение начинается с соседей нулевого элемента — находятся корректирующие коэффициенты соседних нулевому элементов, используя установленные для нулевого элемента значения коэффициентов (по чувствительности 1 и 0 — по смещению) и отношения чувствительностей и от-

носительные смещения нулевого элемента с соседними.

Далее таким же образом на основании найденных корректирующих коэффициентов для соседних нулевому элементов (назовем их определенными элементами, в отличие от тех элементов — назовем неопределенными, для которых корректирующие коэффициенты в текущий момент еще не вычислены) и отношений чувствительности и смещения этих определенных элементов с их соседними неопределенными находятся корректирующие коэффициенты этих соседних элементов. Далее процедура повторяется — по определенным элементам и по их связям с неопределенными соседями находятся корректирующие коэффициенты этих соседей, и так продолжается 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.

Математическое обоснование формирования корректирующих коэффициентов

Формально определяется процедура получения коэффициентов, являющаяся методической основой конкретных алгоритмов и для линейек, и для матриц.

Выпишем скорректированные сигналы по всем элементам (их перечислим одним индексом i , $i \in N$ — множество элементов), запишем межэлементные суммы квадратов и общую сумму, которую минимизируем по множеству переменных $\{A_i^K, B_i^K\}_{i \in N}$ — корректирующих коэффициентов.

Минимум суммы даст оценки $\{\hat{A}_i^K, \hat{B}_i^K\}_{i \in N}$ корректирующих коэффициентов, собственно оценки и есть корректирующие коэффициенты и они используются для корректирования:

$$S_1(t) \cdot A_1^K + B_1^K = S_1^K(t), \dots, S_i(t) \cdot A_i^K + B_i^K = S_i^K(t), \dots,$$

$$S_N(t) \cdot A_N^K + B_N^K = S_N^K(t) \text{ — скорректированные сигналы;}$$

$\sum_{\{i,i+\}} \sum_{t \in T} [S_i^K(t) - S_{i+}^K(t)]^2$ — общая сумма квадратов.

Полученная квадратичная форма разрешается дифференцированием по переменным $\{A_i^K, B_i^K\}_{i \in N}$ и приравниванием нулю получающихся $2 \cdot N$ уравнений. В получаемом определителе N столбцов, соответствующих переменным $\{B_i^K\}_{i \in N}$, последние являются зависимыми, и чтобы устранить эту зависимость, зафиксируем одну из этих переменных, к примеру, $B_1^K = 0$.

Далее для получения фиксированного решения системы еще потребуется зафиксировать значение одной из переменных $\{A_i^K\}_{i \in N}$, для порядка возьмем A_1^K и положим равной 1.

Решение имеет вид:

$$\hat{A}_1^K = 1, \hat{B}_1^K = 0;$$

$$\hat{A}_2^K = A_{1,2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot (1 + \varepsilon_{1,2}) = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{\sigma_{P_1}(T_{1,2})}{\sigma_{P_2}(T_{2,1})} \cdot (1 + \rho_{1,2});$$

$$\hat{B}_2^K = \hat{B}_1^K - B_{2,1} \cdot \hat{A}_2^K = \bar{S}_1(\tau/T_{1,2}) - A_{1,2} \cdot \bar{S}_2(\tau/T_{2,1});$$

. . .

$$\hat{A}_i^K = A_{1,i} = \frac{A_1}{A_i} \cdot (1 + \varepsilon_{1,i}) = \frac{A_1}{A_i} \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \frac{\sigma_{P_j}(T_{j,j+1})}{\sigma_{P_{j+1}}(T_{j+1,j})} \cdot (1 + \rho_{1,i});$$

$$\hat{B}_i^K = \bar{S}_1(\tau/T_{1,2}) - \hat{A}_i^K \cdot \bar{S}_i(\tau/T_{i,i-1}) + \sum_{j=2}^{i-1} \hat{A}_j^K \cdot [\bar{S}_j(\tau/T_{j,j+1}) - \bar{S}_j(\tau/T_{j,j-1})] =$$

$$= \bar{S}_1(\tau/T_{1,2}) - \hat{A}_i^K \cdot \bar{S}_i(\tau/T_{i,i-1}) + \Delta \hat{B}_i^K, \quad i > 2,$$

где $T_{i,i+1}$ и $T_{i+1,i}$ — выборки сигналов элементов i и $i+1$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$);

$\sigma_{P_i}(T_{i,i+1})$ и $\sigma_{P_i}(T_{i+1,i})$, $\bar{S}_i(\tau_{i,i+1}/T_{i,i+1})$ и $\bar{S}_{i+1}(\tau_{i+1,i}/T_{i+1,i})$ — соответственно, среднеквадратические отклонения потоков и средние сигналы по этим выборкам.

Для элемента i выборки $T_{i,i+1}$ и $T_{i,i-1}$ могут совпадать ($T_{i,i+1} = T_{i,i-1} = T_i$ — полная выборка по элементу) или быть различными ($T_{i,i+1} + T_{i,i-1} = T_i$).

Последнее отражает содержание микросканирования — различные выборки одного элемента дают информацию о градиенте потоков и все в целом по всем элементам обеспечивают получение несмещенных оценок корректирующих коэффициентов. Мультипликативное влияние микросканирования на точность в приведенных формулах очевидно, компоненты

$$\prod_{j=1}^{i-1} \frac{\sigma_{P_j}(T_{j,j+1})}{\sigma_{P_{j+1}}(T_{j+1,j})}$$

приближаются к 1.

Аддитивное влияние определяется составляющей $\Delta \hat{B}_i^K$, содержащей изменение средних (на интервале накопления) потоков на элементах, оно подправляет корректирующие коэффициенты при различии этих средних потоков.

Скорректированные сигналы запишутся как:

$$S_1^K(t) = S_1(t) \cdot A_1^K + B_1^K = S_1(t) \cdot 1 + 0 = S_1(t) = P_1(t) \cdot A_1 + B_1 + SH_1(t);$$

$$S_i^K(t) = S_i(t) \cdot A_i^K + B_i^K = P_i(t) \cdot A_1 + B_1 + A_1 \times \\ \times [\bar{P}_1(t/T_{1,2}) - \bar{P}_i(t/T_{i,i-1})] - \Delta P_i(t) \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1,i} + \\ + SH_i(t) \cdot \hat{A}_i^K + \Delta \hat{B}_i^K = P_i(t) \cdot A_1 + B_1 + E_i^K(t).$$

Все сигналы получаются как произведения потока элемента на одну и ту же чувствительность A_1 , плюс смещение B_1 и плюс ошибка $E_i^K(t)$, которая содержит аддитивную компоненту $A_1 \cdot [\bar{P}_1(t) - \bar{P}_i(t)] + \Delta \hat{B}_i^K$ и мультипликативную $\Delta P_i(t) \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1,i}$, а также ошибку из-за шума, равную $SH_i(t) \cdot \hat{A}_i^K$.

Микросканирование в мультипликативной составляющей приближает компоненту $\varepsilon_{1,i}$ к 0, а в аддитивной компоненте составляющая $\Delta \hat{B}_i^K$ компенсирует величину $A_1 \cdot [\bar{P}_1(t) - \bar{P}_i(t)]$.

В заключение выпишем формулу для скорректированного сигнала, после подстановки в общую формулу коррекции

$$S_i^K(t) = S_i(t) \cdot A_i^K + B_i^K$$

и формулу для A_i^K и B_i^K

$$S_i^K(t) = \Delta S_i(t) \cdot \hat{A}_i^K + \Delta \hat{B}_i^K.$$

Первая составляющая содержит изменение (относительно среднего значения) потока на элементе в данный момент времени, а вторая — оценку среднего потока.

Эту оценку (несмещенную) обеспечивает именно микросканирование. В первой составляющей оно улучшает оценку корректирующего коэффициента по чувствительности.

Выводы

1. Разработан метод коррекции неоднородности микросканирующих многоэлементных фотоприемных устройств — матричных и со сканированием — по сигналам сцены, заключающийся в том, что вначале определяют межэлементные связи неоднородности соседних элементов, а затем по топологии связей элементов ФПУ — корректирующие коэффициенты элементов.

2. Использование микросканирования повышает точность сопоставления сигналов соседних элементов, так как оно позволяет сравнивать эти сигналы при одинаковой их потоковой составляющей.

3. Метод предполагает, что существует некая "истинная" модель элементов ФПУ, проявлением которой являются отсчеты сигналов элементов, "истинной" модели ставятся в соответствие рассматриваемая полиномиальная модель (полином 1-й степени — модель "смещение + усиление", или двухточечная) и методика обработки. Конкретный вид обработки дает результат, соответствующий так называемой оценочной модели.

4. Микросканирование снижает ошибку оценивания, на этапе формирования связей соседних элементов обеспечивает точное их сопоставление, а на этапе формирования корректирующих коэффициентов обеспечивает несмещенную оценку коэффициентов по смещению, и за счет точного сопоставления соседних на первом этапе вместе с разветвленностью алгоритма обхода элементов ФПУ повышает точность коэффициентов по чувствительности.

5. Микросканирование снижает, но не исключает влияния сцены на точность коррекции. Максимальный эффект микросканирования обеспечивается при неизменности сцены на интервале соседних по времени отсчетов, чему способствует повышение частоты микросканирования.

Литература

1. Соляков В. Н., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д. и др. Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены// Прикладная физика. 2008. № 1.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Некоторые пути совершенствования тепловизионных систем// Специальная техника. 2004. № 2.
3. Соловьев В. И., Анисимов И. Ю. Оценка качества выравнивания каналов тепловизионных приемников при использовании метода микросканирования// Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 6.
4. Majeed M. Hayat, Bradley M., Ratliff J., Scott Tyo, Kamil Agi. Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction// Proc. of SPIE. 2004. V.1. P. 5556.
5. Соляков В. Н., Жегалов С. И., Морозова В. Г. Результаты практического моделирования коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены: 20-я Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, М., 2008.

FPA nonuniformity scene-based correction method for FPA with microscanning

V. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, V. G. Morozova
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Nonuniformity correction method for FPA with microscanning is considered. In this method adjusting factors are defined through the element-to-element ratio revealed on scene-based signals. The microscanning effect is used for exact comparison of signals of the next elements. Relationship between all elements is established on relationship between next elements. On these relationships adjusting factors are established.

PACS: 85.60.-q