УДК 621.384.3

Метод линеаризированной трехточечной коррекции неоднородности фотоприемных устройств

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

Разработан метод трехточечной коррекции неоднородности фотоприемных устройств. Полиномиальная модель элементов линеаризирует процесс коррекции и упрощает реализацию. Метод рассмотрен для коррекции по сигналам сцены и коррекции с использованием эталонных сигналов.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: метод, коррекция, неоднородность, фотоприемное устройство.

Введение

Актуальной задачей для оптико-электронных систем обработки тепловизионных изображений является устранение неоднородности сигналов, обусловленной различиями в чувствительности к входному потоку элементов фотоприемных устройств (ФПУ).

Для коррекции неоднородности обычно применяют двухточечную схему с компенсацией по чувствительности и по смещению, например [1, 2].

Двухточечный способ обеспечивает коррекцию при условии линейной зависимости сигналов элементов от потока на их входе. Условие соблюдается в ограниченном диапазоне, и чтобы снять огра-

Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ.
Жегалов Станислав Иванович, ведущий научный сотрудник.
Фетюхина Владлена Георгиевна, инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2010 г.

ничение, диапазон используемых для калибровки эталонных потоков согласовывается с текущим диапазоном сигналов сцены.

Нелинейная схема коррекции [3] позволит увеличить рабочий диапазон коррекции и снизить требования к слежению за диапазоном.

Учитывая сложность нелинейной коррекции, естественным последовательным шагом вперед является разработка линеаризированной трехточечной коррекции неоднородности.

Инструментом линеаризированной коррекции является полиномиальная регрессия, сопоставляющая сигналы элементов ФПУ. Параметры регрессии являются корректирующими коэффициентами.

Постановка задачи линеаризированной трехточечной коррекции неоднородности

Имеются N элементов ФПУ, модели которых принимаем трехпараметрическими

$$S_i(t) = C_i \cdot P_i^2(t) + A_i \cdot P_i\ (t) + B_i + SH_i(t),\ \ (i \in N),\ \ (1)$$

где $S_i(t)$ — сигнал элемента;

$P_i(t)$ — поток на элементе;

$SH_i(t)$ — шум;

C_i, A_i и B_i — параметры моделей элементов.

В развитии формулы (1) требуется найти корректирующие коэффициенты C_i^K, A_i^K, B_i^K ($i \in N$) такие, что скорректированные сигналы элементов

$$S_i^K(t) = C_i^K \cdot S_i(t) + A_i^K \cdot \sqrt{S_i(t)} + B_i^K \quad (i \in N) \qquad (2)$$

стремятся друг к другу при одинаковых потоках на входах элементов, т. е.

$$\sum_{i \in N,\, j \in N} \sum_{t \in T_n} [S_j^K(t) - S_i^K(t)]^2 \to \min$$

$$\text{при} \sum_{i \in N,\, j \in N} \sum_{t \in T_n} [P_j\ (t) - P_i\ (t)]^2 \to 0,$$

где T_n — интервал усреднения.

Стремление разности скорректированных сигналов к минимуму, а не к нулю, отражает как присутствие шума, так и то, что три корректирующих коэффициента для линеаризированной формы корректирования (2) не дают точной коррекции и в отсутствие шума.

При коррекции по трем опорным сигналам три параметра регрессии — корректирующие коэффициенты без ошибки сопоставляют сигналы элементов при уровнях, соответствующих уровням опорных сигналов. Сопоставление между уровнями опорных сигналов будет содержать ошибку, если характеристики элементов отличаются по параметрам чувствительности.

Дело в том, что взаимозависимость сигналов пары элементов с полиномиальной зависимостью сигналов от потока не является полиномиальной. В [3] приведены функции точной коррекции, являющиеся нелинейными неполиномиальными и четырехпараметрическими, т. е. линеаризированная коррекция является приближенной по определению.

Линеаризованная коррекция по сигналам сцены (также приближенная) использует ту же полиномиальную регрессию, в части специфики коррекции по сцене исходит из подхода, изложенного в [4].

Представленную общую постановку задачи переформулируем для случая коррекции по сцене и по эталонным сигналам. Упростим постановку, опираясь в первом случае на корреляцию сигналов соседних элементов, а во втором — на корреляцию эталонных сигналов.

При рассмотрении коррекции по сцене от общего минимума разностей скорректированных сигналов можно перейти, исходя из корреляции потоков на входе соседних элементов, к условию в виде

$$\sum_{i=1,2,\ldots,N-1} \sum_{t \in T_n} [S_{i+1}^K(t) - S_i^K(t)]^2 \to \min, \qquad (3)$$

с такой последовательностью обхода элементов, что каждая пара $S_{i+1}^K(t)$, $S_i^K(t)$ является парой сигналов соседних элементов.

Это условие — обход всех элементов ФПУ "от соседа к соседу" приводит к цепочечной структуре уравнений — уравнение связи 1-го и 2-го элементов, 2-го и 3-го и т. д. до N–1-го и N-го элементов.

При такой цепочечной структуре происходит "раскачка" (нарастание) ошибки по мере движения по цепочке. Цепочечная структура взята только с целью наглядности изложения.

Практическая структура обхода элементов — сетевая, позволяющая противодействовать "раскачке" ошибки, представлена в описании [5]. В этой структуре следует только заменить двухпараметрические межэлементные связи на трехпараметрические.

Для коррекции по эталонам сопоставим некоторый элемент (обозначим индексом "1", этим элементом может быть и комбинация любых элементов) с остальными, приходим к минимизации суммы

$$\sum_{i=2,3,\ldots,N} \sum_{t \in T_n} [S_1^K(t) - S_i^K(t)]^2 \to \min.$$

Здесь полагаем, что эталонные — это сигналы с трех опорных источников — три одинаковых по всем элементам уровня потоков $P^{(1)}$, $P^{(2)}$, $P^{(3)}$.

Основная схема метода для коррекции по сцене

Дифференцирование суммы квадратов (3) по параметрам коррекции — их число $3 \cdot N$, дает также $3 \cdot N$ уравнений, из которых независимых только $3 \cdot (N-1)$. Для разрешения ситуации три параметра коррекции из $3 \cdot N$ попросту назначаем.

Если назначим три параметра коррекции для первого элемента из цепочки, то нахождение параметров второго элемента приводит к минимизации суммы квадратов $\sum_{t \in T_n} [S_2^K(t) - S_1^K(t)]^2$, в которой неизвестны только три параметра второго элемента. Аналогично осуществляется нахождение параметров третьего элемента в цепочке и т. д.

Решение

Первая сумма квадратов

$$\sum_{t \in T_n} [S_2^K(t) - S_1^K(t)]^2 = \sum_{t \in T_n} \Big[C_2^K \cdot S_2(t) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(t)} + \\ + B_2^K - C_1^K \cdot S_1(t) - A_1^K \cdot \sqrt{S_1(t)} - B_1^K \Big]^2$$

зависит от шести параметров — корректирующих коэффициентов C_2^K, A_2^K, B_2^K и C_1^K, A_1^K, B_1^K.

Установим (назначим) значения параметров первого элемента

$$\hat{C}_1^K = 1, \quad \hat{A}_1^K = 0, \quad \hat{B}_1^K = 0.$$

Знак "^" над параметрами здесь и далее означают оценку — зафиксированное значение, присваиваемое параметру.

При этом скорректированные сигналы первого элемента будут оставаться без изменения — повторять нескорректированные, а три коэффициента для второго элемента C_2^K, A_2^K, B_2^K могут быть определены из суммы квадратов, в которую подставим предварительно установленное решение по трем параметрам первого элемента $\hat{C}_1^K = 1$, $\hat{A}_1^K = 0$, $\hat{B}_1^K = 0$.

Тогда сумма квадратов запишется как

$$\sum_{t \in T_n} [C_2^K \cdot S_2(t) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(t)} + B_2^K - S_1(t)]^2 \to \min.$$

Продифференцируем сумму по трем искомым параметрам, приравняем продифференцированные выражения к нулю и получим три уравнения, которые представим в матричном виде:

$$[S_2^{T_n}] \cdot [S_2^{T_n}]^{Tr} \cdot [KF_2]^{Tr} = [S_2^{T_n}]^2 \cdot [KF_2]^{Tr} = \\ = [S_2^{T_n}] \cdot [S_1(1, ..., T_n)]^{Tr}, \qquad (4)$$

где матрица $[S_2^{T_n}]$ имеет вид (ее образуют измерения $S_2(t)$ на интервале T_n и назовем ее матрицей T_n-измерений 2-го элемента)

$$[S_2^{T_n}] = \begin{vmatrix} S_2(1) & ... & S_2(T_н) \\ \sqrt{S_2(1)} & ... & \sqrt{S_2(T_н)} \\ 1 & ... & 1 \end{vmatrix};$$

$[S_2^{T_n}]^{Tr}$ — транспонированная матрица T_n-измерений 2-го элемента;

$[S_2^{T_n}]^2$ — квадрат матрицы T_n-измерений 2-го элемента;

$$[KF_2]^{Tr} = \begin{vmatrix} C_2^K \\ A_2^K \\ B_2^K \end{vmatrix}$$ — вектор-столбец корректирующих коэффициентов 2-го элемента;

$[S_1(1, ..., T_n)] = [S_1(1), ..., S_1(T_n)]$ — T_n-строка измерений 1-го элемента.

Решение уравнения (4) связано с определителем: равен он нулю или нет. Если не равен, то система разрешается нахождением обратной матрицы $[[S_2^{T_n}]^2]^{-1}$ и умножением на нее правой части уравнения

$$[K\hat{F}_2]^{Tr} = [[S_2^{T_n}]^2]^{-1} \cdot [S_2^{T_n}] \cdot [S_1(1, ..., T_n)]^{Tr} = \\ = [\hat{S}_2^{T_n}] \cdot [S_1(1, ..., T_n)]^{Tr},$$

где $[K\hat{F}_2]$ — матрица оценок корректирующих коэффициентов;

$[\hat{S}_2^{T_n}] = [[S_2^{T_n}]^2]^{-1} \cdot [S_2^{T_n}]$ — матрица T_n-оценки (так будем называть матрицы этого типа) 2-го элемента.

В этом разделе изложение методики поведем исходя из возможности определения на каждом этапе цепочки всех трех коэффициентов, чтобы дать основное представление о методе.

В следующем разделе модифицируем методику, чтобы разрешить ситуацию с ненулевым определителем.

Скорректированные сигналы 2-го элемента определим выражением:

$$[S_2^K(1, 2, ...)] = [[S_2^K(1, ..., T_n)], [S_2(T_n + \\ +1, T_n + 1, ...)]] = [KF_2] \cdot [[S_2^{T_n}], [S_2^{T_n +}]] = \\ = [[KF_2] \cdot [S_2^{T_n}], [KF_2] \cdot [S_2^{T_n +}]] = \\ = [[S_1(1, ..., T_n)] \cdot [\hat{S}_2^{T_n}]^{Tr} \times \\ \times [S_2^{T_n}], , [S_1(1, ..., T_n)] \cdot [\hat{S}_2^{T_n}]^{Tr} \cdot [S_2^{T_n +}]],$$

где $[S_2^K(1, 2, ...)]$ — строка-вектор скорректированных сигналов 2-го элемента;

$[S_2^K(1,...,T_n)] = [K\hat{F}_2]\cdot[S_2^{T_n}]$ — T_n-строка-вектор скорректированных сигналов 2-го элемента;

$[S_2(T_n+1, T_n+1,...)] = [K\hat{F}_2]\cdot[S_2^{T_n+}]$ — строка-вектор скорректированных сигналов 2-го элемента за пределы T_n-строки;

$[S_2^{T_n}]$ — T_n-строка-вектор исходных (некорректированных) сигналов 2-го элемента;

$[S_2^{T_n+}]$ — строка-вектор некорректированных сигналов 2-го элемента за пределы T_n-строки.

Корректирующие коэффициенты 3-го элемента находятся по аналогии, как и коэффициенты 2-го элемента из условия приведения сигналов 3-го к приведенным сигналам 2-го элемента.

В общем виде для i+1-го элемента корректирующие коэффициенты равны

$$[K\hat{F}_{i+1}]^{Tr} = [[S_{i+1}^{T_n}]^2]^{-1}\cdot[S_{i+1}^{T_n}]\cdot[S_i^K(1,...,T_n)]^{Tr} = \\ = [\hat{S}_{i+1}^{T_n}]\cdot[S_i^K(1,...,T_n)]^{Tr},$$

где $[\hat{S}_{i+1}^{T_n}] = [[S_{i+1}^{T_n}]^2]^{-1}\cdot[S_{i+1}^{T_n}]$ — матрица T_n-оценки i+1-го элемента.

Скорректированные сигналы i+1-го элемента равны

$$[S_{i+1}^K(1,2,...)] = [[S_{i+1}^K(1,...,T_n)],[S_{i+1}\times \\ \times(T_n+1,T_n+1,...)]] = [K\hat{F}_{i+1}]\cdot[[S_{i+1}^{T_n}],[S_{i+1}^{T_n+}]] = \\ = [[K\hat{F}_{i+1}]\cdot[S_{i+1}^{T_n}],[K\hat{F}_{i+1}]\cdot[S_{i+1}^{T_n+}]],$$

где $[S_{i+1}^K(1,2,...)]$ — строка-вектор скорректированных сигналов i+1-го элемента;

$[S_{i+1}^K(1,...,T_n)] = [K\hat{F}_{i+1}]\cdot[S_{i+1}^{T_n}]$ — T_n-строка-вектор скорректированных сигналов i+1-го элемента;

$[S_{i+1}(T_n+1,T_n+1,...)] = [K\hat{F}_{i+1}]\cdot[S_{i+1}^{T_n+}]$ — строка-вектор скорректированных сигналов i+1-го элемента за пределы T_n-строки;

$[S_{i+1}^{T_n}]$ — T_n-строка-вектор исходных (некорректированных) сигналов i+1-го элемента;

$[S_{i+1}^{T_n+}]$ — строка-вектор некорректированных сигналов i+1-го элемента за пределы T_n-строки.

Модификация метода коррекции по сцене

Идея модификации состоит в раздельном определении коэффициентов C_i^K, A_i^K ($i\in N$), связанных с чувствительностью, и коэффициентов по смещению B_i^K ($i\in N$).

Условия определения коэффициентов в общем виде можно сформулировать так:

- для коэффициентов по чувствительности — если есть изменения сигналов, т. е. информация для их определения, тогда решение существует;
- для коэффициентов по смещению информация всегда имеется — они определяются по средним (сигналов), а средние всегда существуют, значит, решение по смещению всегда существует.

Подробнее критерии решения рассмотрим, исследовав суммы квадратов, представив ее информационную часть — принятые сигналы через средние сигналов и их приращения.

Выразив сумму $\sum_{t\in T_n}[S_{i+1}^K(t) - S_i^K(t)]^2$ через приращения сигналов и их средние, получим

$$\begin{gathered}\sum_{t\in T_n}[S_{i+1}^K(t) - S_i^K(t)]^2 = \\ = \sum_{t\in T_n}[\Delta S_{i+1}^K(t) + \bar{S}_{i+1}^K(t) - \Delta S_i^K(t) - \bar{S}_i^K(t)]^2 = \\ = \sum_{t\in T_n}[\Delta S_{i+1}^K(t) - \Delta S_i^K(t)]^2 + \\ +2\cdot\sum_{t\in T_n}[\Delta S_{i+1}^K(t) - \Delta S_i^K(t)]\cdot[\bar{S}_{i+1}^K(t) - \bar{S}_i^K(t)] + \\ + \sum_{t\in T_n}[\bar{S}_{i+1}^K(t) - \bar{S}_i^K(t)]^2.\end{gathered} \tag{5}$$

Второй член в правой части (5) равен нулю по определению (по определению среднего сумма отклонений равна нулю: $\sum_{t\in T_n}[\Delta S_{i+1}^K(t)] = 0$ и $\sum_{t\in T_n}[\Delta S_i^K(t)] = 0$).

Продифференцируем сумму по параметрам C_{i+1}^K, A_{i+1}^K и B_{i+1}^K, получаем три уравнения:

$$\begin{gathered}d/dC_{i+1}^K = \\ = \sum_{t\in T_n}[C_{i+1}^K\cdot\Delta S_{i+1}(t) + A_{i+1}^K\cdot\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} - \Delta S_i^K(t)]\times \\ \times\Delta S_{i+1}(t) + C_{i+1}^K\cdot T_n\cdot[\bar{S}_{i+1}(t)]^2 + A_{i+1}^K\cdot T_n\cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}]\times \\ \times[\bar{S}_{i+1}(t)] + B_{i+1}^K\cdot T_n\cdot[\bar{S}_{i+1}(t)] - T_n\cdot\bar{S}_i^K(t)\cdot\bar{S}_{i+1}(t);\end{gathered}$$

$$\begin{gathered}d/dA_{i+1}^K = \\ = \sum_{t\in T_n}[C_{i+1}^K\cdot\Delta S_{i+1}(t) + A_{i+1}^K\cdot\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} - S_i^K(t)]\times \\ \times\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} + C_{i+1}^K\cdot T_n\cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}]\cdot\bar{S}_{i+1}(t) + \\ + A_{i+1}^K\cdot T_n\cdot E^2[\sqrt{S_{i+1}(t)}] + B_{i+1}^K\cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}] - \\ -T_n\cdot\bar{S}_i^K(t)\cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}] = 0;\end{gathered} \tag{6}$$

$$\begin{gathered}d/dB_{i+1}^K = C_{i+1}^K\cdot\bar{S}_{i+1}(t)\cdot T_n + A_{i+1}^K\cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}]\cdot T_n + \\ +B_{i+1}^K\cdot T_n - \bar{S}_i^K(t)\cdot T_n] = 0,\end{gathered}$$

где $\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)}$ — отклонение, равное разности корня квадратного из сигнала и среднего значения корня квадратного из сигнала

$$\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} = \sqrt{S_{i+1}(t)} - E[\sqrt{S_{i+1}(t)}].$$

Из третьего уравнения выразим B_{i+1}^K,

$$B_{i+1}^K = \bar{S}_i^K(t) - C_{i+1}^K \cdot \bar{S}_{i+1}(t) - A_{i+1}^K \cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}],$$

и подставим в первые два уравнения, получаем

$$d/dC_{i+1}^K = C_{i+1}^K \cdot \sum_{t\in T_n} \Delta S_{i+1}^2(t) + A_{i+1}^K \times \times \sum_{t\in T_n} \Delta S_{i+1}(t) \cdot \Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} - \sum_{t\in T_n} \Delta S_i^K(t) \cdot \Delta S_{i+1}(t) = 0; \quad (7)$$

$$d/dA_{i+1}^K = C_{i+1}^K \cdot \sum_{t\in T_n} \Delta S_{i+1}(t) \cdot \Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} + A_{i+1}^K \times \times \sum_{t\in T_n} [\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)}]^2 - \sum_{t\in T_n} \Delta S_i^K(t) \cdot \sqrt{\Delta S_{i+1}(t)} = 0. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) связывают два параметра по чувствительности C_i^K и A_i^K с изменениями сигналов — $\Delta S_{i+1}(t)$ и $\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)}$ элемента, для которого находятся коэффициенты по чувствительности, и изменениями скорректированных сигналов соседнего (предыдущего) элемента — $\Delta S_i^K(t)$.

Эти уравнения зависят только от изменений сигналов. Так как третье уравнение системы (6) не зависит от изменений сигналов, то коэффициенты по чувствительности определяются только по изменениям сигналов.

Отсюда следует необходимое условие определения коэффициентов по чувствительности — наличие дисперсии (изменчивости) сигналов, а достаточным будет ненулевость определителя пары уравнений (7) и (8), которые перепишем в более компактном виде, заменив суммы произведений дисперсиями (оценками дисперсий):

$$C_{i+1}^K \cdot \sigma_{S_{i+1}}^2 + A_{i+1}^K \cdot \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} = \sigma_{S_i^K, S_{i+1}}; \quad (9)$$

$$C_{i+1}^K \cdot \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} + A_{i+1}^K \cdot \sigma_{\sqrt{S_{i+1}}}^2 = \sigma_{S_i^K,\sqrt{S_{i+1}}}, \quad (10)$$

где $\sigma_{S_{i+1}}^2 = \sum_{t\in T_n} \Delta S_{i+1}^2(t)$ — дисперсия сигнала i+1-го элемента (S_{i+1}^2 — дисперсия);

$\sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} = \sum_{t\in T_n} \Delta S_{i+1}(t) \cdot \Delta\sqrt{S_{i+1}(t)} - S_{i+1} \cdot \sqrt{S_{i+1}}$ — дисперсия сигнала i+1-го элемента;

$\sigma_{S_i^K, S_{i+1}} = \sum_{t\in T_n} \Delta S_i^K(t) \cdot \Delta S_{i+1}(t) - S_i^K \cdot S_{i+1}$ — дисперсия сигналов i-го и i+1-го элементов;

$\sigma_{\sqrt{S_{i+1}}}^2 = \sum_{t\in T_n} [\Delta\sqrt{S_{i+1}(t)}]^2 - \sqrt{S_{i+1}} \cdot \sqrt{S_{i+1}}$ — дисперсия сигналов i+1-го элемента;

$\sigma_{S_i^K,\sqrt{S_{i+1}}} = \sum_{t\in T_n} \Delta S_i^K(t) \cdot \sqrt{\Delta S_{i+1}(t)} - S_i^K \cdot \sqrt{S_{i+1}}$ — дисперсия сигналов i-го и i+1-го элементов.

Запишем (9) и (10) в матричном виде

$$[\sigma(S_{i+1})] \cdot [\Delta KF_{i+1}] = [\sigma(S_i^K, S_{i+1}],$$

где $[\sigma(S_{i+1})] = \begin{vmatrix} \sigma_{S_{i+1}}^2 & \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} \\ \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} & \sigma_{\sqrt{S_{i+1}}}^2 \end{vmatrix}$ — матрица дисперсий i+1-го элемента;

$[\Delta KF_{i+1}] = \begin{vmatrix} C_{i+1}^K \\ A_{i+1}^K \end{vmatrix}$ — корректирующие коэффициенты по чувствительности i+1-го элемента;

$[\sigma(S_i^K, S_{i+1}] = \begin{vmatrix} \sigma_{S_i^K, S_{i+1}} \\ \sigma_{S_i^K,\sqrt{S_{i+1}}} \end{vmatrix}$ — матрица смешанных (i-го и i+1-го элементов) дисперсий.

Если определитель матрицы $[\sigma(S_{i+1})]$ не равен нулю, то коэффициенты равны

$$[\Delta K\hat{F}_{i+1}] = [\sigma(S_{i+1})]^{-1} \cdot [\sigma(S_i^K, S_{i+1}] = \begin{vmatrix} \hat{C}_{i+1}^K \\ \hat{A}_{i+1}^K \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{S_{i+1}}^2 & \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} \\ \sigma_{S_{i+1},\sqrt{S_{i+1}}} & \sigma_{\sqrt{S_{i+1}}}^2 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \sigma_{S_i^K, S_{i+1}} \\ \sigma_{S_i^K,\sqrt{S_{i+1}}} \end{vmatrix},$$

где $[\sigma(S_{i+1})]^{-1}$ — матрица, обратная матрице $[\sigma(S_{i+1})]$.

Если определитель равен нулю, то полагаем, что коэффициенты по чувствительности не могут быть определены.

Коэффициент B_{i+1}^K определится из третьего уравнения

$$\hat{B}_{i+1}^K = \bar{S}_i^K(t) - \hat{C}_{i+1}^K \cdot \bar{S}_{i+1}(t) - \hat{A}_{i+1}^K \cdot E[\sqrt{S_{i+1}(t)}].$$

Методика трехточечной коррекции по опорным источникам

Рассмотрим суммы:

$$\sum_{t\in T_n} [S_1^K(t) - S_i^K(t)]^2 \to \min, \quad i = 2, \ldots N.$$

Скорректированные сигналы первого элемента оставим без изменения

$$S_1^K(t) = S_1(t),$$

т. е. его корректирующие коэффициенты примем равными:

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

Первая сумма будет разрешена.

Для i-й суммы (i-го элемента) корректирующие коэффициенты запишутся

$$[K\hat{F}_i]^{Tr} = [[S_i^{T_n}]^2]^{-1} \cdot [S_i^{T_n}] \cdot [S_1(1,...,T_n)]^{Tr} = \\ = [\hat{S}_i^{T_n}] \cdot [S_1(1,...,T_i)]^{Tr},$$

а скорректированные сигналы

$$[S_i^K(1,2,...)] = [K\hat{F}_i] \cdot [S_i] = [S_1(1,...,T_n)] \cdot [\hat{S}_i^{T_n}]^{Tr} \cdot [S_i],$$

где $[S_i] = \begin{vmatrix} S_i(1) & S_i(2) & ... \\ \sqrt{S_i(1)} & \sqrt{S_i(2)} & ... \\ 1 & 1 & ... \end{vmatrix}.$

Несколько видоизменим методику, имея в виду ее упрощение и повышение надежности.

- Первое — скорректированные сигналы всех элементов зависят от T_n-выборки $[S_1(1,...,T_n)]$ сигналов первого элемента — все приводятся к этой выборке.

Чтобы убрать зависимость всех элементов только от одного, можно в качестве такой выборки взять, например, взвешенную сумму сигналов всех элементов

$$[S_0(1,...,T_n)] = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} [S_i(1,...,T_n)],$$

и все элементы, включая первый, привести к этой выборке.

- Второе — учитывая, что эталонные сигналы имеют только три уровня, можно в целях упрощения (точность коррекции это не увеличит) взять вместо T_n-выборок $[S_1(1,...,T_n)]$-выборки длиной 3,

$$\left[S_i \left(\frac{1}{T_n^{(1)}} \sum_{t \in T_n^{(1)}} S_i(t), \frac{1}{T_n^{(2)}} \sum_{t \in T_n^{(2)}} S_i(t), \frac{1}{T_n^{(3)}} \sum_{t \in T_n^{(3)}} S_i(t) \right) \right],$$

полученные усреднением на интервалах постоянных уровней эталонных сигналов.

Заключение

Разработан метод линеаризированной трехточечной коррекции неоднородности элементов ФПУ. Линеаризацию обеспечивает полиномиальное сопоставление сигналов элементов ФПУ. Это сопоставление является приближенным, но упрощает реализацию. Корректирующие коэффициенты определяются по величине изменений сигналов и средних значений сигналов в сцене. Метод разработан для коррекции по сцене и по опорным сигналам.

Литература

1. *Филачёв А. М., Пономаренко В. П. и др.* Тепловизионная камера на основе неохлаждаемых болометрических ФПУ// Прикладная физика. 2003. № 2.
2. *Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И.* Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 128×128: Обзор ГУП «НПО "Орион"», 1999.
3. *Соляков В. Н., Морозова В. Г., Жегалов С. И.* Нелинейная коррекция неоднородности тепловизионных фотоприемных устройств// Прикладная физика (в печати), 2010.
4. *Соляков В. Н., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Филачев А. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Свиридов А. Н.* Метод коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемных устройств по сигналам сцены// Там же. 2008. № 1.
5. *Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Филачев А. М.:* Пат. на изобретение 2298884. "Способ коррекции неоднородности матричных фотоприемных устройств", зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 10 мая 2007 г.

FPA nonuniformity linerized three-point correction method

V. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, V. G. Fetuchina
Orion Research-and-Production Association, 46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

The method of three-point nonuniformity correction is developed. Polynomial model of elements signals linearization process of correction also simplifies realization. The method is considered for scene-based nonuniformity correction and correction with use of basic signals.

PACS: 85.60.-q

Keywords: method, correction, inhomogenety, photoreceiver.

Bibliography — 5 references. *Received 2 February 2010*