

УДК 621.384.3

Нелинейная коррекция неоднородности тепловизионных фотоприемных устройств

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

Рассмотрена трехточечная коррекция неоднородности элементов фотоприемных устройств в контексте с двухточечной коррекцией и для случая нелинейной зависимости сигналов элементов от входного потока. Определена общность между коррекцией по опорным источникам и коррекцией по сцене. Однородность приведенных сигналов элементов имеет два содержания, которым соответствуют два способа приведения: по сигналам и по потокам. Найдены функции приведения по обоим способам.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: коррекция, фотоприемные устройства, нелинейный, тепловизионный.

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. Наглядным примером для случая использования эталонных сигналов является метод, представленный, например, в [1—3], он обеспечивает компенсацию по чувствительности и смещению.

Двухточечный способ обеспечивает коррекцию при условии линейной зависимости сигналов элементов от потока на их входе. В ограниченном диапазоне сигналов наблюдаемой сцены это условие часто соблюдается с достаточной точностью. Для того чтобы отклонения от линейной зависимости были минимальными, диапазон эталонных потоков согласовывается с текущим диапазоном сигналов сцены. Требуется также обеспечивать однородность засветки элементов ФПУ эталонными источниками, так как от равномерности зависит точность корректирующих коэффициентов.

Требование однородности засветки элементов имеет значение и для коррекции без эталонных

источников — по сигналам сцены, но там это условие ограничено только однородностью засветки соседних элементов.

Модель элемента в целом не является линейной. При этом двухточечная коррекция дает удовлетворительные результаты только в ограниченном диапазоне сигналов и требует повторения при изменении уровня сигналов сцены.

Нелинейная схема коррекции позволяет увеличить рабочий диапазон коррекции, понизить требования к слежению за диапазоном. С другой стороны, общая цель тепловизионного изображения может предполагать воспроизведение не только потоковой сцены, но и температуры на объектах наблюдаемой сцены. Поток нелинейно зависит от температуры, и в целом сигналы с элементов ФПУ можно рассматривать как проявление нелинейности перехода температуры тел в поток излучения с учетом неоднородности коэффициента излучения [4, 5] и проявление неоднородности элементов ФПУ при преобразовании ими потока в сигналы.

Первый аргумент — расширение рабочего диапазона схемы коррекции, второй — возможность оценивания распределения собственно температуры, что актуализирует исследование нелинейной коррекции неоднородности.

Под нелинейной коррекцией в общем случае понимается совокупный процесс корректирования нелинейности и корректирования неоднородности. Причем в одних случаях это может быть только коррекция неоднородности, а в других — и то и другое.

Учитывая методическую сложность коррекции вообще и нелинейную, в частности, естественным последовательным шагом вперед является разработка трехточечной коррекции.

Методически задача коррекции весьма сложна. Сложность в том, что нужно оценивать передаточные характеристики элементов, не имея в распоряжении входных воздействий. Оцениваются

Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ.
Жегалов Станислав Иванович, ведущий научный специалист.
Морозова Владлена Георгиевна, инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (495) 374-94-00.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2009 г.

относительные характеристики элементов, но это и достаточно, если иметь в виду, что изображение относительно по своей природе — его восприятие человеческим глазом основано на отношениях яркостей отдельных составляющих. Остается "только" установить связь между относительными характеристиками элементов и выходными сигналами (скорректированным изображением).

Усложняют задачу и необходимость (при коррекции по сцене) оценивания межэлементных связей по принципу "от соседа к соседу", с последовательным нарастанием ошибки по мере продвижения от элемента к элементу, и нелинейность процедур, имеющая своими корнями как нелинейность характеристик, так и методическую — та же самая линейная модель содержит нелинейные процедуры обработки.

Помимо неоднородности и нелинейности, в качестве возмущений рассматривается и временной шум, значения которого меняются с каждым моментом времени. Процессы коррекции касаются и дефектные элементы, которые должны быть идентифицированы, в том числе и по показателям временного шума.

Подход к исследованию — модельный, аналогичный приведенному в работе [3]: входной сигнал соответствует реальной ("истинной") модели элемента, предполагаемая модель элемента является нелинейной (трехпараметрической) — схема коррекции реализует эту модель, результаты коррекции соответствуют оценочной модели — оценке предполагаемой модели. Результаты "вбирают" в себя ошибки реализации предполагаемой модели, ошибки из-за конечности и неоднородности выборок сигналов, ошибку несоответствия предполагаемой модели "истинной". Последнюю ошибку называют ошибкой выбора модели.

Трехпараметрическая модель элемента ФПУ

Трехпараметрическая модель элемента описывается полиномом 2-й степени,

$$S(t) = C \cdot P^2(t) + A \cdot P(t) + B + SH(t),$$

где $S(t)$ — сигнал на выходе элемента, $S(t) > 0$;

$P(t)$ — входной поток, $P(t) > 0$;

C, A, B — параметры преобразования потока, $C > 0$ или $C < 0$, $A > 0$, $B > 0$. При $C > 0$ передаточная характеристика выпуклая, при $C < 0$ — вогнутая; параметры будем называть: B и A — по аналогии с двухточечной коррекцией — смещением и чувствительностью, C — изменчивостью чувствительности;

$SH(t)$ — временной шум.

Диапазон рассматриваемых потоков исходит из условия, что поток больше нуля, и из условия монотонного возрастания сигнала с ростом значения потока: при $C < 0$ поток не больше величины, до которой производная сигнала по потоку больше нуля, $P(t) < A / (-2 \cdot |C|)$, $|C|$ — абсолютная величина C ; при $C > 0$ положим $P(t) < A / (2 \cdot C)$ — для единообразия, снижения общности не происходит.

Приведение сигналов элементов ФПУ

Общие положения

Термин "приведение" в определенном смысле эквивалентен термину "коррекция". Его появление обусловлено только тем, на взгляд авторов, что при рассмотрении межэлементных связей он нагляднее выражает суть преобразований сигналов. Одновременно он и "разгружает" широкоупотребляемый термин "коррекция".

Приведение сигналов элементов осуществляется через их сопоставление. Основой является сопоставление сигналов пары элементов, на основании которого сопоставляются сигналы всех элементов.

Цель сопоставления сигналов пары элементов — определение коэффициентов приведения (выравнивания) сигналов одного элемента к другому таким, что приведенные сигналы этих элементов будут одинаковы при их одинаковых входных потоках.

Собственно это и есть цель коррекции неоднородности пары элементов, а приведение сигналов любой пары элементов дает возможность привести сигналы всех элементов ФПУ к одному или к некоторому усредненному элементу.

Основой приведения служит то, что входные потоки соседних элементов в среднем близки (коррелированы) — будь то использование для коррекции опорных сигналов или же использование сцены.

Для опорных сигналов эта корреляция изначально заложена в схему — опорные сигналы берутся одинаковыми по элементам и равномерными (одинаковыми) во времени. Аналогично и со средним отклонением опорных сигналов, оно равномерно по элементам и во времени.

При использовании сцены корреляция в общем случае наблюдается только для соседних (близких) элементов. Поэтому вначале нужно сопоставить соседние элементы, а сопоставления удаленных осуществляются на основе связей соседних.

Расчетные формулы получаются рекуррентными — коэффициенты каждого последующего элемента (сопоставление начинается от одного какого-то элемента), включают в себя коэффициенты предыдущих, которые в свою очередь включают

свои предыдущие и т. д., получается вложение (рекурсия), причем по умножению — это ошибка растет (раскачивается) при движении от элемента к элементу.

Раскачке ошибки можно противодействовать применением специальных статистически устойчивых методов обхода элементов ФПУ при формировании корректирующих коэффициентов.

Анализ точности коррекции по сцене показал, что асимптотически она стремится к нулевой с ростом интервала наблюдения используемой для определения корректирующих коэффициентов сцены, когда в среднем попадающие на элементы ФПУ потоки попарно одинаковы и попарно одинаковы отклонения потоков, т. е. в отличие от использования эталонных источников при использовании сцены требуется только попарная корреляция сигналов, а общую корреляцию между элементами устанавливает алгоритм обхода элементов при формировании корректирующих коэффициентов, который должен быть (и это принципиально) устойчивым к погрешности рекурсии.

Сказанное подчеркивает общность процесса коррекции в независимости от природы калибровочных сигналов, с одной стороны, и с другой — показывает принципиальные отличия и подчеркивает необходимость учета фактора сложности коррекции по сцене. Еще более важным фактором для трехточечной коррекции является то, что сама по себе нелинейность, помимо неоднородности, усложняет процедуры определения корректирующих коэффициентов.

Коэффициенты приведения соседних элементов определяются из сравнения сигналов элементов на некотором интервале усреднения (наблюдения) T_n .

Интервал T_n сверху ограничен стационарностью неоднородности элементов — он должен быть меньше периода, на котором влияние изменения неоднородности элементов на результат коррекции еще пренебрежимо мало.

Оценка снизу — интервал должен быть достаточным для устойчивой оценки коэффициентов приведения. Увеличение интервала снижает влияние временного шума на коэффициенты, сглаживает различия между элементами в средних и в отклонениях потоков. Это последнее определяет остаточный после коррекции "геометрический" шум.

Шумы и конечность интервала сопоставления определяют ошибку определения корректирующих коэффициентов, которую нужно как-то оценивать, и прежде всего нужна точка отсчета для этой ошибки.

В качестве такой точки можно взять идеализированную модель. Для пары элементов она выглядит так: на оба элемента попадает один и тот же

поток, "истинная" модель совпадает с предполагаемой, временной шум отсутствует, и при этих условиях находятся коэффициенты приведения, обеспечивающие нулевое расхождение скорректированных сигналов этих элементов.

Такое приведение будем называть "точным" приведением. Его ошибка равна нулю, этому нулю соответствуют и "нулевые" условия определения корректирующих коэффициентов. Изменения в сторону "ненулевых" условий приведут к ошибкам, сопоставление которых с величиной изменений даст критерий ошибки, т. е. появится возможность оценивания и сопоставления реальных (неидеализированных) вариантов схем коррекции.

Для точного и "неточного" приведений также возможно приведение по потокам и сигналам. Поясним эти понятия.

Так, для двухточечной коррекции корректирование состоит в применении к исходному сигналу линейного оператора коррекции, содержащего корректирующие коэффициенты по чувствительности и по смещению, и результатом корректирования также является линейная конструкция от потока, так как исходный сигнал также является линейной формой потока. Это — приведение по потокам, т. е., если в качестве результата корректирования принимаем линейную конструкцию потока и строим для этого соответствующую схему коррекции — выражаем из сигналов в форме линейной конструкции потока элементов и их сопоставляем, то корректирование будем относить к коррекции по потокам.

Приведение по сигналам — это сопоставление и выравнивание нелинейных передаточных характеристик элементов.

Заметим, что если корректируем по потокам, то одновременно с выравниваем — коррекцией неоднородности элементов осуществляем и коррекцию нелинейности передаточных характеристик элементов. Причем эта коррекция происходит вместе с коррекцией неоднородности и, вообще говоря, не может быть выделена отдельно.

Дополнительно заметим, что приведение по потокам не означает, что результатом коррекции будут потоки в чистом виде. Располагая только сигналами, результат коррекции можем получить только "сигнальный", но по величине пропорции между результатами-сигналами будут соответствовать пропорциям потоков.

Эти рассуждения достаточно тривиальны, но если к ним добавить, что помимо визуализации существует и канал автоматической обработки скорректированных сигналов, на вход которого для обработки целесообразнее подавать потоки в их "первозданном" виде (в незаулучшенном нелинейным преобразованием), то можно утвер-

ждать о предпочтительности выравнивания по потокам, нежели по сигналам.

Рисунок на примере передаточных характеристик иллюстрирует коррекцию по сигналам и потокам.

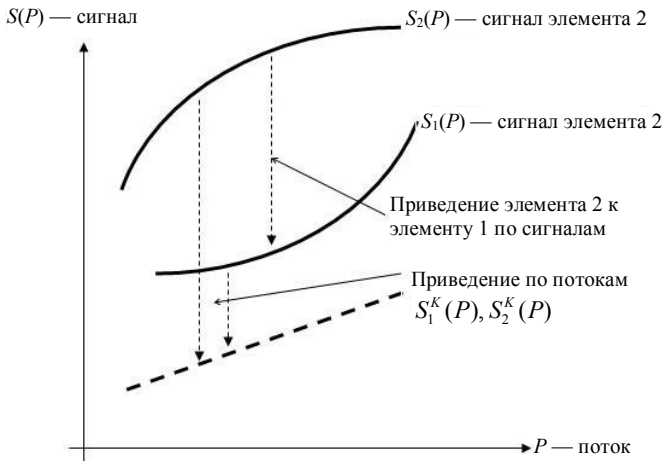


Иллюстрация приведения сигналов пары элементов по сигналам и по потокам. $S_1(P)$ — передаточная характеристика 1-го элемента, $S_2(P)$ — 2-го элемента, $S_1^k(P), S_2^k(P)$ — приведенные по потокам передаточные характеристики элементов

Приведение сигналов пары элементов — составная часть приведения сигналов всех элементов ФПУ. Схематически приведение всех элементов выглядит так.

Для коррекции по сцене: пусть имеется N элементов, приведение начинается с пары 1-й и 2-й элементы (2-й приводится к первому), далее — 2-й и 3-й — 3-й приводится ко второму, 3-й и 4-й и т. д. При этом номера соответствуют порядковому номеру взятия для выравнивания очередного невыровненного элемента. Очевидно, что определенным (не всяким) порядком можно включить в выравнивание все элементы и каждый элемент будет браться только один раз.

Упорядоченность обхода элементов влияет на точность выравнивания, но здесь этот аспект опускаем, чтобы не усложнять изложения.

Для коррекции по опорным сигналам: порядок обхода элементов неважен, так как по определению могут сопоставляться любые два элемента. Поэтому естественный порядок действий состоит в сопоставлении одного элемента со всеми или некоторого усредненного элемента со всеми.

Приведение элементов по сигналам

Термин "приведение элементов по сигналам" — сокращение от точного по смыслу, но тавтологического по форме "приведение сигналов элементов по сигналам".

Условие точного приведения двух элементов по сигналам — i -го и $i+1$ -го состоит в следующем:

требуется найти функцию $f(C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, [D_{i,i+1}], S_{i+1}(P))$ трех или четырех параметров (почему трех или четырех — об этом ниже) и значения ее параметров $C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, [D_{i,i+1}]$ такие, что

$$f(C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, [D_{i,i+1}], S_{i+1}(P)) = S_i(P)$$

для всех $P > 0$ при любых наборах $C_i, A_i, B_i, C_{i+1}, A_{i+1}, B_{i+1}$ — вещественные числа, где $S_i(P) = C_i \cdot P^2 + A_i \cdot P + B_i$ — зависимость от потока P сигнала i -го элемента — через параметры C_i, A_i, B_i ;

$S_{i+1}(P) = C_{i+1} \cdot P^2 + A_{i+1} \cdot P + B_{i+1}$ — зависимость от потока сигнала другого элемента, $i+1$ -го — через параметры $C_{i+1}, A_{i+1}, B_{i+1}$.

В процессе поиска была найдена трехпараметрическая функция, "обратный" полином, степени полинома равны 1, 1/2, 0

$$f(C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, S_{i+1}(P)) = C_{i,i+1} \cdot S_{i+1}(P) + A_{i,i+1} \cdot \sqrt{S_{i+1}(P)} + B_{i,i+1},$$

которая удовлетворяет сформулированному условию для $P > 0$, но не для всех наборов множества $C_i \times A_i \times B_i \times C_{i+1} \times A_{i+1} \times B_{i+1}$.

Проверка выполнения условия выглядит следующим образом: выписывается уравнение

$$C_{i,i+1} \cdot S_{i+1}(P) + A_{i,i+1} \cdot \sqrt{S_{i+1}(P)} + B_{i,i+1} - S_i(P) = 0, \quad (1)$$

в котором $S_{i+1}(P)$ и $S_i(P)$ выражаются через параметры $C_{i+1}, A_{i+1}, B_{i+1}$ и C_i, A_i, B_i , и находится область значений этих параметров, что для каждой точки этой области при всех значениях $P > 0$ существуют коэффициенты приведения $C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}$, при которых уравнение удовлетворяется. Искомая область должна представлять все возможные для практики характеристики пары элементов — выпуклые и вогнутые, монотонно возрастающие (сигнал монотонно растет с увеличением потока), тогда приведение считается удовлетворительным.

Проверка уравнения производится для степени P , причем вначале уравнение "освобождается" от корня возведением в квадрат — слева остается корень, а право переносится остальное.

В итоге получается пять степеней P : 0, 1, 2, 3, 4 и, соответственно, пять уравнений, которые должны быть удовлетворены (неудовлетворены) или удовлетворены в ограниченной области параметров $C_{i+1}, A_{i+1}, B_{i+1}$ и C_i, A_i, B_i тремя коэффициентами приведения.

Не дает точного приведения и "прямой" полином 2-й степени

$$f(C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, S_{i+1}(P)) = C_{i,i+1} \cdot S_{i+1}^2(P) + A_{i,i+1} \cdot S_{i+1}(P) + B_{i,i+1} \quad (2)$$

Но модифицировав (1), добавив еще один параметр $D_{i,i+1}$ — четвертый, получаем функцию точного приведения по сигналам

$$f(C_{i,i+1}, A_{i,i+1}, B_{i,i+1}, D_{i,i+1}, S_{i+1}(P)) = C_{i,i+1} \cdot S_{i+1}(P) + A_{i,i+1} \cdot \sqrt{S_{i+1}(P) + D_{i,i+1}} + B_{i,i+1} \quad (3)$$

Эта функция показывает связь пары элементов. Сформулируем задачу точного приведения N элементов для функции парного приведения (3).

Имеется N элементов ФПУ, модели которых принимаем трехпараметрическими

$$S_i(P) = C_i \cdot P^2 + A_i \cdot P + B_i, \quad i \in N,$$

где $S_i(P)$ — сигнал элемента при потоке P ;

шум элемента равен нулю (одно из условий точного приведения).

Требуется найти корректирующие коэффициенты $C_i^K, A_i^K, D_i^K, B_i^K$ ($i \in N$) такие, что

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

$S_i^K(P) = C_i^K \cdot S_i(P) + A_i^K \cdot \sqrt{S_i(P) + D_i^K} + B_i^K, \quad i = 2, \dots, N$ — скорректированные сигналы, и

$$\sum_{P \in P_{i,i+1}} [S_{i+1}^K(P) - S_i^K(P)]^2 \rightarrow \min, \quad i = 2, \dots, N;$$

$P_{i,i+1}$ — выборка потоков на паре элементов, состоит из ряда значений потоков, каждое значение выборки воздействует одновременно на оба элемента пары.

Отметим, что стремление суммы квадратов к минимуму эквивалентно стремлению к нулю, так как компоненты суммы больше нуля.

Корректирующие коэффициенты для 1-го элемента полагаем равными $C_i = 1, A_i = 0, D_i = 0, B_i = 0$, отсюда следует $S_1^K(P) = S_1(P)$.

Для $i = 1$ можно записать

$$\sum_{P \in P_{i,i+1}} [C_2^K \cdot S_2(P) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(P) + D_2^K} + B_2^K - S_1(P)]^2 \rightarrow 0.$$

Точное приведение дает нулевой квадрат суммы, а так как каждый элемент суммы не меньше нуля, то условие равенства суммы нулю разбивается на условия равенства нулю каждого элемента суммы, т. е.

$$[C_2^K \cdot S_2(P) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(P) + D_2^K} + B_2^K - S_1(P)]^2 = 0,$$

и далее

$$C_2^K \cdot S_2(P) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(P) + D_2^K} + B_2^K = S_1(P)$$

для всех P выборки (для любого P из выборки).

Перепишем последнее выражение, подставив в него выражения $S_1(P)$ и $S_2(P)$ через потоки

$$C_2^K \cdot [C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + B_2] + A_2^K \cdot \sqrt{C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + B_2 + D_2^K} + B_2^K = C_1 \cdot P^2 + A_1 \cdot P + B_1$$

для всех P выборки.

Коэффициент C_2^K найдем из условия равенства коэффициентов при P^2 :

$$C_2^K \cdot C_2 \cdot P^2 = C_1 \cdot P^2,$$

получаем

$$C_2^K = \frac{C_1}{C_2}.$$

Коэффициенты A_2^K и D_2^K получим из приравнения коэффициентов при P в первой степени.

Предварительно заметим, что выражение $\sqrt{C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + B_2 + D_2^K}$ всегда при всех P будет линейной формой от P , если коэффициент

$$D_2^K = \frac{A_2^2}{4 \cdot C_2} - B_2.$$

При $C_2 > 0$ имеем

$$\begin{aligned} & \sqrt{C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + B_2 + D_2^K} = \\ & = \sqrt{C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + \frac{A_2^2}{4 \cdot C_2}} = \sqrt{C_2} \cdot P + \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{C_2}}. \end{aligned}$$

При $C_2 < 0$ имеем

$$\begin{aligned} & \sqrt{C_2 \cdot P^2 + A_2 \cdot P + B_2 + D_2^K} = \\ & = \sqrt{-|C_2| \cdot P^2 + A_2 \cdot P - \frac{A_2^2}{4 \cdot |C_2|}} = \text{im} \cdot \left[\sqrt{|C_2|} \times \right. \\ & \left. \times P - \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{|C_2|}} \right], \end{aligned}$$

где $\text{im} = \sqrt{-1}$.

Тогда A_2^K равен

$$A_2^K = \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{C_2}} \quad \text{при } C_2 > 0,$$

$$A_2^K = \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\text{im} \cdot \sqrt{|C_2|}} \quad \text{при } C_2 < 0.$$

Коэффициент B_2^K равен

$$B_2^K = B_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot B_2 - \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{C_2}} \cdot \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{C_2}}$$

при $C_2 > 0$;

$$B_2^K = B_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot B_2 + \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{|C_2|}} \cdot \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{|C_2|}}$$

при $C_2 < 0$.

Скорректированные сигналы $S_2^K(P)$ равны:

$$\begin{aligned} S_2^K(P) &= C_2^K \cdot S_2(P) + A_2^K \cdot \sqrt{S_2(P) + D_2^K} + B_2^K = \\ &= \frac{C_1}{C_2} \cdot S_2(P) + \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{C_2}} \cdot \left[\sqrt{C_2} \cdot P + \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{C_2}} \right] + B_1 - \\ &- \frac{C_1}{C_2} \cdot B_2 - \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{C_2}} \cdot \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{C_2}} \quad \text{при } C_2 > 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2^K(P) &= \frac{C_1}{C_2} \cdot S_2(P) + \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{|C_2|}} \cdot \left[\sqrt{|C_2|} \cdot P - \right. \\ &\left. - \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{|C_2|}} \right] + B_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot B_2 + \frac{A_1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot A_2}{\sqrt{|C_2|}} \cdot \frac{A_2}{2 \cdot \sqrt{|C_2|}} \quad \text{при } C_2 < 0. \end{aligned}$$

Можно видеть, что скорректированные сигналы $S_2^K(P)$ имеют вид полинома второй степени от потока P , поэтому методику приведения сигналов 1-го и 2-го элементов можно перенести на приведение скорректированных сигналов 2-го элемента и сигналов 3-го элемента и т. д., т. е. на приведение скорректированных сигналов i -го элемента и сигналов $i+1$ -го элементов и далее до $N-1$ -го и N -го элементов.

Приведение сигналов элементов по потокам

Методику вначале поясним на двухточечной калибровке.

Выпишем по сигналам соседних элементов схему получения (параметрического извлечения)

потоков из их сигналов и сопоставим потоки соседних элементов посредством суммы квадратов их разности:

$$\begin{aligned} &\sum_{P \in P_{i,j+1}} \left[\frac{S_i(P) - \hat{B}_i}{\hat{A}_i} - \frac{S_{i+1}(P) - \hat{B}_{i+1}}{\hat{A}_{i+1}} \right]^2 = \\ &= \sum_{P \in P_{i,j+1}} \left[A_{i+1,i} [S_i(P) - \hat{B}_i] - S_{i+1}(P) - \hat{B}_{i+1} \right]^2 = \quad (4) \\ &= \sum_{P \in P_{i,j+1}} \left[A_{i+1,i} S_i(P) - A_{i+1,i} B_i - S_{i+1}(P) - \hat{B}_{i+1} \right]^2 = \\ &= \sum_{P \in P_{i,j+1}} \left[A_{i+1,i} \cdot S_i(P) - B_{i+1,i} - S_{i+1}(P) \right]^2 \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где $P_{i,j+1}$ — выборка потоков, соответствующих сигналам на некотором интервале T_n .

Правая часть (4) получилась как связь неизвестных отношения чувствительностей и относительного смещения.

Манипуляции с параметрами \hat{A}_i , \hat{A}_{i+1} , \hat{B}_i , \hat{B}_{i+1} : переход от левой части (4) к правой осуществляется через последовательность формальных операций — умножение обеих частей разности на \hat{A}_{i+1} , вынесение общего множителя, переобозначение.

Переход иллюстрирует возможность определения из (4) либо параметров для i -го элемента при известных для $(i+1)$ -го, либо $(i+1)$ -го при известных для i -го элемента, либо относительных параметров $\hat{A}_{i+1,i}$ и $\hat{B}_{i+1,i}$, связывающих параметры этих соседних элементов.

Перейдем теперь к трехточечной калибровке.

Выпишем уравнение связи сигналов приведения пары элементов в виде, т. е. выразим, как и выше, поток из сигнала одного элемента, подставим его выражение в модель другого элемента, и сопоставим вначале по сигналам

$$\begin{aligned} &\sum_{t \in T} \left[\hat{C}_{i+1} \cdot \left[\frac{S_i(t) - \hat{B}_i - \hat{P}_i \cdot \hat{A}_i}{\hat{C}_i} \right] + \right. \\ &\left. + \hat{A}_{i+1} \sqrt{\frac{S_i(t) - \hat{B}_i - \hat{P}_i \cdot \hat{A}_i}{\hat{C}_i} + \hat{B}_{i+1} - S_{i+1}(t)} \right]^2. \quad (5) \end{aligned}$$

Дифференцирование по \hat{C}_i , \hat{A}_i , \hat{B}_i и \hat{P}_i дает четыре уравнения для четырех неизвестных.

Выражение (5) относится к точному приведению по сигналам.

Исходя из (5), переходя к сопоставлению потоков, получаем конструкцию приведения по потокам, т. е.

$$\sum_{t \in T} [\hat{A}_i \sqrt{S_i(t) + \hat{D}_i} + \hat{B}_i - \hat{A}_{i+1} \sqrt{S_{i+1}(t) + \hat{D}_{i+1}} - \hat{B}_{i+1}]^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для системы из выражения (6), выписанной для совокупностей пар соседних элементов, при квадратичной зависимости сигнала от потока существует точное решение — положить $\hat{A}_1^* = 1, \hat{B}_1^* = 0$ (со звездочкой обозначены искомые значения параметров). Параметры $\hat{D}_1^*, \hat{D}_2^*, \hat{A}_2^*, \hat{B}_2^*$ найти из (6) для 1-го и 2-го элементов, а $\hat{D}_i^*, \hat{A}_i^*, \hat{B}_i^* (i > 2)$ последовательно определяются из выражения (6) для пар $(i-1)$ -го и i -го элементов. Скорректированные сигналы — величины $\hat{A}_i^* \sqrt{S_i(t) + \hat{D}_i^*} + \hat{B}_i^*$, пропорциональны потокам $P(t)$.

Покажем существование такого решения.

Если $\hat{D}_i^* = \frac{A_i^2}{4 \cdot C_i} - B_i$, то корень i -го элемента будет равен

$$\begin{aligned} \sqrt{S_i(t) + \hat{D}_i} &= \sqrt{C_i \cdot P^2(t) + A_i \cdot P(t) + \frac{A_i^2}{4 \cdot C_i}} = \\ &= \sqrt{C_i} \cdot P(t) + \frac{A_i}{2 \cdot \sqrt{C_i}} \end{aligned}$$

при $C_i > 0$

$$\text{и } \sqrt{S_i(t) + \hat{D}_i} = \text{im} \cdot [\sqrt{|C_i|} \cdot P - \frac{A_i}{2 \cdot \sqrt{|C_i|}}],$$

где $\text{im} = \sqrt{-1}$ — комплексный параметр;

$|\cdot|$ — абсолютная величина при $C_i < 0$.

И в том и другом случае имеем в качестве корня линейную форму от P .

Корень $i+1$ -го элемента $\sqrt{S_{i+1}(t) + \hat{D}_{i+1}}$ при $\hat{D}_{i+1}^* = \frac{A_{i+1}^2}{4 \cdot C_{i+1}} - B_{i+1}$ дает, соответственно,

$$\sqrt{C_{i+1}} \cdot P(t) + \frac{A_{i+1}}{2 \cdot \sqrt{C_{i+1}}} \quad \text{— при } C_{i+1} > 0 \quad \text{и}$$

$$\text{im} \cdot [\sqrt{|C_{i+1}|} \cdot P - \frac{A_{i+1}}{2 \cdot \sqrt{|C_{i+1}|}}] \quad \text{— при } C_{i+1} < 0.$$

Посредством пары коэффициентов \hat{A}_{i+1} и \hat{B}_{i+1} они могут быть и мнимыми, всегда можно приравнять корни i -го и $i+1$ -го элементов — $\sqrt{S_i(t) + \hat{D}_i}$ и $\sqrt{S_{i+1}(t) + \hat{D}_{i+1}}$ при любом сочетании C_i и C_{i+1} .

Однако найденные точные приведения по сигналам и потокам для практического применения

малоприменимы из-за неразработанности точных методов решения систем нелинейных уравнений.

Практической альтернативой будет приближенное решение точных приведений. Но тогда возникает другая альтернатива — сразу взять приближенное трехточечное приведение и решать его точным алгоритмом.

Такая процедура построена — линеаризованное трехточечное приведение по сигналам. Этому вопросу посвящена отдельная статья.

Заключение

Проведенное рассмотрение проблемы нелинейной коррекции ФПУ можно кратко охарактеризовать и обобщить следующим образом:

1. Исследуется трехточечная коррекция неоднородности элементов ФПУ. Подход к исследованию — модельный: сигнал соответствует реальной ("истинной") модели элемента. Рассматриваемая модель элемента является трехпараметрической, схема коррекции реализует эту модель, результаты коррекции соответствуют оценочной модели. Результаты "вбирают" в себя ошибки реализации рассматриваемой модели, ошибки из-за конечности и неоднородности выборок сигналов, а также ошибку несоответствия рассматриваемой модели "истинной" — ошибку выбора модели.

2. Трехточечная коррекция исследуется в контексте с двухточечной в связи с нелинейностью элементов, определена общность между коррекцией по опорным источникам и коррекцией по сцене. В отличие от использования эталонных источников при коррекции по сцене требуется только попарная корреляция сигналов, а общую корреляцию между элементами устанавливает алгоритм обхода элементов при формировании корректирующих коэффициентов.

3. Приведение сигналов элементов ФПУ осуществляется через сопоставление сигналов пар элементов. Приведение пар дает возможность привести сигналы всех элементов ФПУ к одному или к некоторому усредненному элементу, т. е. осуществить коррекцию всех элементов.

4. Одинаковость приведенных сигналов элементов имеет два содержания, которым соответствуют два способа приведения: по сигналам и по потокам. Приведение по потокам соответствует приведению характеристик элементов с устранением нелинейности характеристик, приведение по сигналам — приведению без устранения нелинейности характеристик.

5. Шумы и конечность интервала сопоставления определяют ошибку корректирующих коэф-

фициентов. В качестве точки отсчета ошибки берется идеализированная модель. Для пары элементов она выглядит так — на оба элемента попадает один и тот же поток, "истинная" модель совпадает с предполагаемой, временной шум отсутствует. При этих условиях существуют коэффициенты приведения, обеспечивающие нулевое расхождение скорректированных сигналов элементов.

Изменения в сторону "ненулевых" условий приводит к ошибкам, сопоставление которых с величиной изменений дает критерий ошибки, и появляется возможность оценивания реальных вариантов схем коррекции.

6. Для трехпараметрической коррекции найдены нелинейные четырехпараметрическая функция точного приведения по сигналам и трехпараметрическая — приведения по потокам. Реализация

этих функций затруднительна, практичнее линейризованные трехпараметрические функции неточного (приближенного) приведения.

Л и т е р а т у р а

1. Филачев А. М., Пономаренко В. П. и др.//Прикладная физика. 2003. № 2. С. 75.
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., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Филачев А. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Свиридов А. Н.//Прикладная физика. 2008. № 1. С. 86.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.

Nonlinear correction of IRFPA nonuniformity

W. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, V. G. Morozova

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

Below in the article, we have considered the three-point correction of FPA non-uniformity and compared it with two-point correction. We have assumed nonlinear signal dependence on input stream. We have found community between the reference source correction and the scene-based correction. The uniformity of adjusted signals of elements is demonstrating us two things corresponded to the signals reduction and flow reduction methods. We have found reduction functions according to both mentioned methods.

PACS: 85.60.-q

Keywords: correction, FPA, nonlinear, thermal imaging, uniformity.

Bibliography — 5 references.

Received October 15, 2009