
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.7.013

С. М. Борзов, В. И. Козик, А. С. Феокистов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАМЕР

Проведено сравнение различных методов стендовой калибровки тепловизионных приемников, оценена стабильность их параметров. Показано, что выполнение коррекции непосредственно после калибровки позволяет достигать высокого качества изображений.

Ключевые слова: тепловизионный приемник, коррекция неоднородности, дефектные элементы.

Введение. Контрастность изображений, полученных в инфракрасной области излучения при комнатной температуре, довольно низка. Это накладывает жесткие требования к качеству тепловизионных приемников. Например, для достоверного распознавания объектов, температура которых различается на один градус, среднеквадратичное значение вариации чувствительности элементов не должно превышать 0,1—0,2 % [1]. Несмотря на успехи в создании фотоприемных матриц невозможно обеспечить выполнение требований к уровню шума, обусловленного неоднородностью темновых сигналов и чувствительностью элементов, а также наличием дефектов, только за счет совершенствования технологии их изготовления, поэтому требуется коррекция полученных изображений. Методы коррекции и калибровки, а также периодичность калибровки приборов зависят от специфики используемых фотоприемных матриц. Для устранения такого шума проводится стендовая калибровка прибора по опорным источникам. С этой целью используется выходной сигнал от двух и более источников для вычисления коэффициентов коррекции и восстановления входного изображения. Методы коррекции различаются числом используемых источников и типом кривых, аппроксимирующих передаточные характеристики ФПУ. Наиболее прост метод двухточечной коррекции, при котором поведение элемента описывается линейной моделью [3]. В действительности зависимость выходного сигнала от входного носит более сложный характер [4, 5], поэтому необходимо выбирать оптимальную аппроксимирующую кривую. В настоящей работе исследована эффективность коррекции матричных тепловизионных приемников на основе узкозонных твердых растворов кадмий—ртуть—теллур (КРТ) [2].

Методы калибровки. Для оценки необходимой степени нелинейности аппроксимирующей кривой исследовалась эффективность коррекции тепловизионных фотоприемных устройств на базе матричного КРТ-фотоприемника 320×256 элементов при аппроксимации передаточной функции полиномами различных степеней.

Для калибровки использовались наборы однородных тестовых изображений, полученные в результате съемки абсолютно черного тела (АЧТ) исследуемым прибором. Каждый набор изображений включает серии по 100 кадров для заданных значений температуры АЧТ.

Изображения получены для характерного рабочего диапазона температур — от 10 до 60 °С. Чтобы исследовать временную стабильность коррекции, испытания проводились в течение как одного сеанса работы прибора, так и нескольких (в разные дни).

Перед калибровкой элементов ФПУ проводился поиск дефектных элементов. Можно разделить дефекты путем сравнения соответствующей характеристики (темновой сигнал, чувствительность, шум) с некоторым пороговым значением.

Целесообразно отсекают дефектные по темновым сигналам и чувствительности элементы, чтобы сигналы оставшихся элементов укладывались в диапазон оцифровки АЦП в рабочем диапазоне температур, т.е.

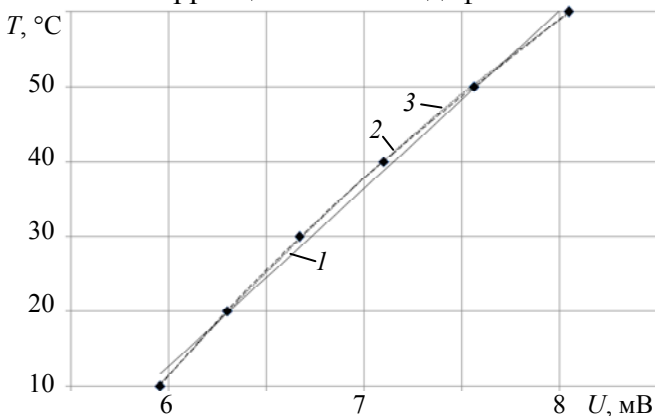
$$U_t(1 + P_t) + \Delta U(1 + P_{\Delta U}) \leq U_{\max},$$

где U_t — средний темновой сигнал, ΔU — средняя разность максимальных и минимальных сигналов для рабочего диапазона температур, P_t и $P_{\Delta U}$ — пороговые значения (в процентах) для темнового сигнала и разности сигналов соответственно, U_{\max} — верхняя граница диапазона АЦП. Поэтому в общем случае условия дефектности по темновым сигналам и чувствительности должны зависеть от характеристик ФПУ — средних значений темновых и максимальных сигналов, разрядности АЦП.

Для определения среднего значения темновых сигналов при температуре АЧТ 10° С считывалась серия кадров, по каждому из них выполнялась медианная фильтрация с целью устранения влияния дефектных элементов, после чего вычислялся усредненный по серии массив, по которому определялось среднее значение выходного сигнала. Аналогичная процедура выполнялась при температуре АЧТ 60 °С для определения максимальных сигналов. У исследуемого прибора $U_t \approx 6 \cdot 10^3$, а $\Delta U \approx 2,2 \cdot 10^3$. Разрядность АЦП составляла 14, т.е. $U_{\max} \approx 16 \cdot 10^3$ градаций. Приняв $P_t = P_{\Delta U} = P$, чтобы не выйти за диапазон оцифровки АЦП, получаем $P_{\max} \approx 95$ %. Дефектным считался элемент, темновой сигнал или чувствительность которого превышала средний на 90 % или чувствительность была ниже средней на 50 %.

Дефектные элементы по шуму определялись из условия обеспечения требуемого разрешения (рассчитывалась эквивалентная шуму разность температур — NETD). Величина порога составляла 50 % от среднего значения.

Чтобы избежать влияния дефектов на оценку работы алгоритмов калибровки, при выполнении коррекции значения дефектных элементов заменялись на средние по полю.



Для сравнения использовались линейная, квадратичная и кубическая аппроксимации. Каждый из 100 кадров пересчитывался с использованием аппроксимирующих полиномов в эквивалентное температурное поле, результат усреднялся (\bar{u}). Примеры различных вариантов аппроксимации динамической характеристики элемента приведены на рисунке (1 — линейная, 2 — квадратичная, 3 — кубическая аппроксимация). Кривые для квадратичной и кубической аппроксимаций практически сливаются. Достоверность для

линейной, квадратичной и кубической аппроксимации составила соответственно

$$R_1^2 = 0,9948, R_2^2 = 0,9991 \text{ и } R_3^2 = 0,9998,$$

$$\text{где } R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, SST = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}.$$

В табл. 1 представлены результаты коррекции при разных методах аппроксимации, приведены СКО (δ) по матрице, а в последней строке — средняя ошибка ($\bar{\Delta}$) и среднее СКО ($\bar{\delta}$) по всем значениям температуры. Видно, что квадратичная аппроксимация обеспечивает существенно меньшее среднее значение ошибки, чем линейная. Более высокая степень аппроксимации не приводит к существенному снижению ошибки. Квадратичная аппроксимация по сравнению с линейной дает выигрыш более чем в 8 раз, а кубическая по сравнению с квадратичной — примерно на 20 %. Если учесть соотношение вычислительных затрат, можно сделать вывод о предпочтительности использования полинома 2-й степени, хотя при этом разброс значений по различным элементам примерно в два раза больше, чем при использовании полинома 3-й степени.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	Линейная аппроксимация		Квадратичная аппроксимация		Кубическая аппроксимация	
	\bar{U}	δ	\bar{U}	δ	\bar{U}	δ
10	11,45	0,60	10,03	0,11	9,93	0,05
20	19,77	0,16	20,07	0,17	20,19	0,12
30	28,64	0,56	29,77	0,16	29,83	0,12
40	38,93	0,62	40,07	0,24	40,01	0,14
50	49,90	0,25	50,16	0,38	50,06	0,31
60	61,31	0,67	59,88	0,66	59,98	0,11
$\bar{\Delta}, \bar{\delta}$	0,92	0,48	0,11	0,29	0,09	0,14

Стабильность качества коррекции. Коррекция неоднородности и замещение дефектов позволяют существенно повысить качество изображения. Однако серьезную проблему представляет временная нестабильность элементов ФПУ, которую можно разделить на два типа. К первому относятся СКО, рассчитанные по последовательности кадров, полученных в результате одного сеанса измерений (как отмечалось, элементы с высоким значением СКО можно определить как дефектные по шуму). Ко второму типу относится изменение характеристик от сеанса к сеансу.

Для оценки стабильности характеристик определялись ухудшение качества коррекции и изменение маски дефектных элементов. Чтобы оценить изменение качества коррекции, как реперное использовалось среднее значение NETD отдельных элементов по матрице в целом, при этом усреднение проводилось по серии для каждого значения температуры и по различным тепловым полям. Ниже приведен разброс сигналов элементов ФПУ при однородной заливке при различных сеансах. Как видно, из-за изменения параметров погрешность увеличивается примерно в три раза.

Разброс сигналов

Без коррекции.....	30—60 NETD
Коррекция неоднородности после расчета коэффициентов.....	<1,7 NETD
Коррекция неоднородности через сутки.....	3—4 NETD

В табл. 2 отображено число дефектных элементов по темновому сигналу, чувствительности и шуму для разных сеансов измерений.

Таблица 2

Элементы	Первый день	Второй день	Третий день
Дефектные по темновому сигналу, шт.	3761	3590	3349
Дефектные по чувствительности, шт.	2111	2378	968
Дефектные по СКО, шт.	668	510	493
Не совпавшие по темновому сигналу, шт.	1099		
Не совпавшие по чувствительности, шт.	2063		
Не совпавшие по СКО, шт.	253		

Заключение. Традиционные процедуры коррекции, такие как устранение неоднородности чувствительности и замещение дефектных элементов, позволяют достигать высокого качества изображений при их применении непосредственно после выполнения калибровки. Показано, что вполне оправданно использование квадратичной аппроксимации, обеспечивающей погрешность измерений по матрице менее 1,7 NETD. Более высокая степень аппроксимации не приводит к существенному снижению ошибки приближения.

Существенное влияние на качество получаемых изображений оказывает временная изменчивость параметров элементов ФПУ. Погрешность измерений, выполненных через сутки после осуществления процедуры калибровки, увеличивается до 3—4 NETD. Кроме того, большое влияние на качество изображений оказывают дефектные элементы. При этом существуют дефектные элементы, которые не изменяют своих параметров от сеанса к сеансу, и элементы, проявляющие себя как дефектные лишь в некоторых сеансах. Элементы, дефектные по чувствительности, в различных сеансах практически не совпадают.

В связи со значительной временной нестабильностью параметров элементов необходимо использовать методы коррекции в „полевых“ условиях, позволяющие компенсировать изменение во времени значений чувствительности и темнового сигнала и определять и замечать дефектные элементы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-07-00202), Программы Президиума РАН (проект № 15.3) и Программы СО РАН (интеграционный проект № 74).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Friedenberg A., Goldblatt I.* Nonuniformity two-point lines correction errors in infrared focal plane arrays // Opt. Eng. 1998. N 37.
2. *Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г.* и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001.
3. *Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г.* Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004.
4. *Borovytsky V. N.* Residual error after non-uniformity correction // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2000. Vol. 3, N 1. P. 102—105.
5. *Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И.* Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 6. С. 11—17.

Сведения об авторах

- Сергей Михайлович Борзов** — канд. техн. наук; Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: borzov@iae.nsk.su
- Виктор Иванович Козик** — канд. техн. наук; Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск; старший научный сотрудник; E-mail: kozik@iae.nsk.su
- Артем Сергеевич Феоктистов** — Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирский государственный университет, кафедра автоматизация физико-технических исследований; инженер-программист; E-mail: feoktistov.artem@gmail.com

Рекомендована
ИАиЭ СО РАН

Поступила в редакцию
22.03.13 г.