

# ВЫРАВНИВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИСПРАВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА В ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ МЕТОДОМ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КОРРЕКЦИИ

Солина Н. И.

Информационные технологии моделирования и управления: Междунар. сб. науч. тр. — Под ред. д.т.н., проф. О. Я. Кравца. Вып. 15. — Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2004.

В данной статье описывается обработка тепловизионных изображений с целью улучшения их качества для выдачи на индикаторное устройство. Обработка производилась средствами нейроматричного аппарата вычислений отечественного цифрового сигнального нейропроцессора Л1879ВМ1 (международное название NM6403, разработка научно-технического центра «Модуль», г. Москва) [1]. Процедура улучшения изображения позволяет сделать изображение визуально более качественным, а также преобразовать изображение к виду, удобному для машинного анализа.

## **Введение**

Во время работы тепловизионной системы происходят изменения сигналов (появление шумов), зависящие от внутренних причин, из-за которых теряются фрагменты изображений. Причинами появления шумов являются: дискретная природа вещества, из которого сделаны фоточувствительные элементы матрицы (разброс характеристик фоточувствительных элементов), зернистость матрицы (битые пиксели), излучение (атомы, фотоны), тепловое движение частиц, быстрые флуктуации относительно среднего значения сигнала [2] и т.д. Шумы нарушают точность измерения и являются причиной низкого предела обнаружения объектов. Влияние шума можно минимизировать как аппаратными, так и программными средствами. Существуют различные методы, обеспечивающие подавление (далее — *исправление*) шума. Процесс исправления шума это коррекция неоднородности чувствительности. Данный процесс является одной из основных функций для матричных фотоприемников и осуществляется с помощью процедуры калибровки. Процедура калибровки [3, 4] в работе проводилась методом двухточечной коррекции. Данный метод позволяет произвести оценку неравномерности изображения и уровня шума тепловизионного сигнала по двум разным значениям температур при равномерной засветке объектива. Для этого производится расчет относительной среднеквадратической неравномерности для входного и выходного кадра, определяется усредненное по всем элементам значение уровня шума.

## **Двухточечная калибровка**

Калибровка по первой точке называется холодной калибровкой (калибровка по «низкой» температуре) и осуществляется по температуре окружающей среды. Калибровка по второй точке проводится по температуре на 20°C более высокой, чем для первой точки, и называется она горячей калибровкой (калибровка по «высокой» температуре).

Калибровка является подготовительной функцией, при которой определяются параметры улучшения качества изображения (поправочные коэффициенты), а

также выявляются «дефектные» элементы матрицы тепловизора. Под «дефектными» элементами понимаются элементы с высокой чувствительностью или чувствительностью, близкой к нулю, и геометрическими искажениями. Точки изображения, соответствующие элементам, чья чувствительность близка к нулю, будут черными, а соответствующие элементам с чувствительностью выше нормальной для данной матрицы — значительно более светлыми, чем для элементов с нормальной чувствительностью.

Калибровка фоточувствительных элементов тепловизора по «низкой» температуре проводится с целью вычисления коэффициентов компенсации постоянной составляющей сигнала фоточувствительных элементов. Калибровка фоточувствительных элементов тепловизора по «высокой» температуре проводится с целью вычисления коэффициентов компенсации разброса вольтовой чувствительности.

### **Выравнивание чувствительности и исправление геометрического искажения**

Чувствительность — это уровень входного напряжения при заданном отношении сигнал/шум на выходе по мощности. Выравнивание чувствительности производится для того, чтобы все элементы изображения равномерно освещенного объекта воспроизводились с одинаковой яркостью.

На оптическую систему поступает входной сигнал  $f(t)$ , искажаемый таким образом, что на выходе получается сигнал  $U$ . Для того чтобы найти искажения, используется стандартный метод [5], записанный в виде:

$$U = kf(t) + b, \quad (1)$$

где  $k$  и  $b$  — случайные процессы, которые описывают простейшие случайные искажения сигнала.  $k$  — мультипликативный шум (вольтовая чувствительность),  $b$  — аддитивный шум (геометрическое искажение). Геометрическое искажение возникает благодаря переотражению поступающего сигнала внутри объектива или в случае, когда сигнал от нагретого объектива забивает более слабый сигнал от объекта, находящегося на большом расстоянии от камеры. Коэффициент  $b$  позволяет уменьшить неравномерности изображения в рабочем диапазоне «низких» температур, связанных с геометрическими искажениями и получить равномерную засветку экрана; другими словами — обеспечить точную «установку нуля». Коэффициент  $k$  используется для учета разброса чувствительности элементов матрицы и позволяет выравнивать вольтовую чувствительность фоточувствительных элементов матрицы.

Вольтовая чувствительность — производная выходного сигнала по температуре  $dU/dt$ . Так как в тепловизоре работа осуществляется с температурой, то входной сигнал  $f(t)$  можно заменить температурой  $T$ . Тогда (1) будет выглядеть следующим образом:

$$U = kT + b, \quad (2)$$

Опираясь на метод двухточечной коррекции, воспользуемся двумя значениями температуры, чтобы составить систему линейных уравнений для нахождения поправочных коэффициентов  $k$  и  $b$ :

$$\begin{cases} U_1 = kT_1 + b, \\ U_2 = kT_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_1 - b = kT_1, \\ U_2 - b = kT_2, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = U_1 - \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} T_1; \\ k = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1}. \end{cases} \quad (3)$$

На этапе реализации данного метода на нейропроцессоре Л1879ВМ1 было выявлено, что поправочные коэффициенты (3) плохо отражают реальный диапазон изменения сигнала исправных элементов. Также при реализации вышеописанного метода пришлось столкнуться с появлением мерцающих точек, после чего (2) было пересмотрено и реализовано в виде:

$$f(t) = (U - b)k, \quad (4)$$

Так как обрабатываются значения не одного кадра, а «бесконечного» потока кадров, то (4) будет записано в виде:

$$a'_{ij} = (a_{ij} - b_{ij}) \times k_{ij}, \quad (5)$$

где  $a_{ij}$  — исходные значения кадра;

$a'_{ij}$  — обработанные значения кадра;

$b_{ij}$  — поправочный коэффициент  $i, j$  значения кадра для точной «установки нуля» по «низкой» температуре;

$k_{ij}$  — поправочный коэффициент  $i, j$  значения кадра для учета разброса фоточувствительных элементов матрицы по «высокой» температуре.

Расчет поправочных коэффициентов  $b_{ij}$  проводится в режиме калибровки по «низкой» температуре. Приход очередного кадра вызывает выполнение программы, т.е. программа работает только с одним кадром. Сколько будет кадров, столько раз будет выполняться программа. Количество кадров в 1 секунду равно 25. Во время работы калибровки по «низкой» температуре производится обработка 356 кадров, что составляет 6 порций накоплений кадров. Во всех порциях накопления, кроме второй, участвует по 68 кадров. Во второй порции количество кадров составляет 16 и используется для расчета среднего отклонения значений кодов (СКО). Первая порция накопления кадров используется для расчета математического ожидания (МО). Третья порция — для вычисления первоначальных усредненных значений кадров для последующего расчета  $b_{ij}$  в четвертой порции. В четвертой, пятой и шестой порциях рассчитывается  $b_{ij}$ . Для определения значений коэффициентов  $b_{ij}$  используют 272 кадра: четыре порции накопления по 68 кадров в каждой. Каждая из четырех порций накопления рассчитывается с помощью метода накопления с фильтрацией [6]:

$$a'_{ij} = \text{ц.ч.} \left[ \frac{a_{ij} - aa'_{ij}}{2^q} + aa'_{ij} \right], \quad (6)$$

где  $a'_{ij}$  — коды текущего фильтрованного кадра (усредненные значения 68 накопленных кадров);

$a_{ij}$  — коды текущего нефильтрованного кадра;

$aa'_{ij}$  — коды предыдущего накопленного кадра (усредненные значения 68 накопленных кадров);

$q$  — время накопления кадров, измеряется в количестве накопленных кадров ( $2^q$ ).

Расчет каждой порций накопления производится следующим образом. Вначале суммируются первые 4 кадра, полученное значение усредняется и используется в дальнейшем как начальное для функции накопления 64 кадров методом накопления с фильтрацией (6). Время накопления кадров  $q$  определяет количество накопленных кадров. Для 64 кадров  $q$  равняется 6.

Для получения усредненного результата используется матрица, производящая деление на 64 с помощью операции умножения с накоплением на векторном процессоре.

Значение коэффициентов  $b_{ij}$  определяется по формуле:

$$b_{ij} = \text{ц.ч.} \left( \frac{a'_{ij} + aa'_{ij}}{2} \right), \quad (7)$$

где  $aa'_{ij}$  — первоначальные усредненные значения 68 накопленных кадров (третья порция) или же значение  $b_{ij}$ , вычисленное на предыдущем этапе,  $a'_{ij}$  — усредненные значения следующих 68 накопленных кадров (четвертая порция).

Расчет  $b_{ij}$  производится поэтапно:

1. Используются значения, полученные во время расчета четвертой порции накопления кадров. Они складываются с усредненными значениями, полученными при расчете третьей порции. Результат усредняют.
2. Значения из пятой порции суммируют со значениями  $b_{ij}$ , полученными на первом этапе, и усредняют.
3. Значения из шестой порции накопления кадров суммируют со значениями, полученными на предыдущем шаге, и снова усредняют. Данные результаты являются значениями коэффициентов  $b_{ij}$ , для коррекции кодов всех поступающих кадров.

По полученным результатам  $b_{ij}$  в специально отведенной области памяти формируется таблица поправочных коэффициентов для обеспечения аппаратной корректировки значений кадров.

Во время работы калибровки по «высокой» температуре производится обработка 220 кадров, что составляет 4 порции накоплений кадров. Во всех порциях накопления, кроме второй, участвует по 68 кадров. Во второй порции количество кадров составляет 16, и она используется для расчета нового СКО.

Первая порция накопления кадров используется для расчета нового МО. Третья порция — для вычисления первоначальных усредненных значений кадров для расчета  $k_{ij}$  в четвертой порции. В четвертой порции накопления кадров  $k_{ij}$  рассчитывается по формуле, аналогичной расчету  $b_{ij}$  (7). Расчет поправочных коэффициентов  $k_{ij}$  проводится в режиме калибровки по «высокой» температуре по формуле:

$$k_{ij} = \text{ц.ч.} \left( \frac{a'_{ij} + aa'_{ij}}{2} \right), \quad (8)$$

Расчет  $k_{ij}$ :

1. Производится предварительный расчет поправочных коэффициентов  $k_{ij}$  по формуле (8).

Значения, полученные во время расчета текущей порции накопления кадров, складываются с усредненными значениями, полученными при расчете предыдущей порции. Результат усредняют.

2. Производится окончательный расчет поправочных коэффициентов  $k_{ij}$ . В начале определяется среднее значение поправочного коэффициента всего кадра по полученным на первом этапе поправочным коэффициентам  $k_{ij}$ :

$$k_{ij}sr = \frac{1}{N * M} \sum_{i=1; j=1}^{N, M} k_{ij}, \quad (9)$$

где  $N$  — количество строк матрицы,  $M$  — столбцов.

Затем производится вычисление максимального значения поправочного коэффициента:

$$k_{ij}Max = 2 * k_{ij}sr . \quad (10)$$

Используя значение  $k_{ij}Max$ , производится определение неисправных элементов кадра. Для этого было введено условие  $k_{ij}Max / 4 < k_{ij} < k_{ij}Max$ , по которому элементы, не удовлетворяющие условию, считаются неисправными [7].

По полученным результатам  $k_{ij}$  в специально отведенной области памяти формируется таблица поправочных коэффициентов для обеспечения аппаратной корректировки значений кадров.

Так как вольтовая чувствительность фоточувствительной площадки формируется как разность между средними арифметическими значениями кодов, полученными по «высокой» и «низкой» температурам (6), то разность средних значений кодов при равномерной засветке входного зрачка по «высокой» и «низкой» температурам не должна превышать некоторого порога на минимальную вольтовую чувствительность. Порог чувствительности — это минимальный или максимальный обнаруживаемый оптический поток, эквивалентный шуму [2], т.е. «под пороговой чувствительностью прибора понимается минимальная и максимальная облученность входа прибора, при которой обеспечивается его надежная безотказная работа, а в тепловизионных приборах при этом имеется четкое изображение наблюдаемого предмета» [8]. Значение порога было подобрано опытным путем и равно 50, и используется для отбраковки площадок с низкой вольтовой чувствительностью.

Во время выполнения процедур калибровки по «низкой» и «высокой» температурам были рассчитаны значения  $MO\_C$ ,  $MO\_H$ ,  $CKO\_C$  и  $CKO\_H$ , где символы  $\_C$  означает «низкую» температуру, а символы  $\_H$  — «высокую». Первая порция накопленных и усредненных 68 кадров по формуле (6) используется для расчета значения  $MO\_C$  и  $MO\_H$ . Значения  $MO$  по «низкой» и «высокой» температурам необходимы для определения неисправных элементов и их отбраковки по чувствительности. В таком случае разность между значениями  $MO$  по «высокой» и по «низкой» температурам должна быть меньше допустимого предела:

$$(MO\_H - MO\_C) < 50.$$

В результате отбраковки в таблице «дефектных» элементов на место неисправных элементов будет записан код «FFFF».

Во второй порции накопления значений кадров количество кадров составляет 16 и используется для расчета СКО\_С по «низкой» и СКО\_Н по «высокой» температурам. Расчет производится следующим образом:

1. На основе полученного значения МО для каждого значения кадра рассчитываются значения СКО по каждому из 16-и приходящих кадров:

$$СКО_{ij} = | a_{ij} - MO_{ij} |$$

Для СКО\_С используется МО\_С, а для СКО\_Н — МО\_Н.

2. Полученные значения СКО<sub>ij</sub> для каждого кода кадра усредняются и записываются в специально отведенную для них область памяти.

Для отбраковки «шумящих» фоточувствительных площадок были введены значения порогов, ограничивающие нижнюю и верхнюю границы значений СКО по «низкой» и «высокой» температурам. Нижняя граница СКО по «низкой» температуре равна NPOR\_С=1, верхняя — VPOR\_С=40. Нижняя граница СКО по «высокой» температуре равна NPOR\_Н=2, верхняя VPOR\_Н=50 (значения были подобраны опытным путем). То есть фоточувствительный элемент будет считаться неисправным при проведении процедуры калибровки по «низкой» температуре, если СКО временной реализации кодов лежит в пределах: СКО < NPOR\_С или СКО > VPOR\_С. Аналогично при проведении процедуры калибровки по «высокой» температуре элемент считается неисправным, если выполняется условие: СКО < NPOR\_Н или СКО > VPOR\_Н. В результате отбраковки в таблице «дефектных» элементов на место отбракованных элементов будет записан код «FFFF».

В процессе отладки программы калибровки по двум точкам в нее была добавлена процедура корректировки коэффициентов  $b_{ij}$  (корректировка нулевого уровня), исключающая возможность появления отрицательных значений разности  $a_{ij} - b_{ij}$  в (5) с помощью значений поправочных коэффициентов  $k_{ij}$  :

$$b'_{ij} = b_{ij} - \Delta * k_{ij}, \quad (11)$$

Корректировка нулевого уровня производится по нижней границе для отрицательных значений. Если  $b_{ij} < 0$ , то  $b_{ij} = 0$ . Глубина корректировки результатов калибровки по «низкой» температуре ( $\Delta$ ) определяет разность температур, на которую корректируются результаты калибровки. Диапазон изменений  $\Delta$  — от 0 до 32 в зависимости от используемой матрицы. Чаще всего использовалось значение 5.

После корректировки  $b_{ij}$  и  $k_{ij}$  производится формирование таблиц поправочных коэффициентов и «дефектных» элементов для обеспечения программной корректировки значений кадров при работе в реальном масштабе времени. Сформированные таблицы переписываются в ОЗУ интерфейсного модуля. Таблицы «дефектных» элементов содержат информацию о неисправных элементах, методах их исправления (интерполяция или замена) и информацию об исправных элементах, участвующих в устранении неисправностей. На этом процедура ка-

либровки заканчивается. Включается режим реального времени. Каждый проходящий кадр обрабатывается с учетом полученных поправочных коэффициентов, тем самым выравнивая фоточувствительные элементы по чувствительности (5).

#### **Список использованных источников**

- [1] Процессор NeuroMatrix Л1879ВМ1. Computer Review, 1998, №21 (71).
- [2] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с., ил.
- [3] Солина Н.И. Алгоритм функции калибровки оцифрованных сигналов для улучшения качества изображения. Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта: Материалы 2-й Межд. науч.-техн. конф. — Вологда: ВоГТУ, 2003. — 207 с.
- [4] Солина Н.И. Расчет поправочных коэффициентов в режиме калибровки по низкой температуре на нейропроцессоре NM6403 (Л1879ВМ1). Труды 4-й Межд. конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки». Естеств. науки. Часть 17. Самара. 2003. — 164 с.
- [5] Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.: ил.
- [6] Солина Н.И. Решение проблемы обработки изображения в реальном времени на нейропроцессоре Л1879ВМ1. Девятая научная конференция «Современные проблемы информатизации». г. Воронеж. 20-29 декабря 2003г.
- [7] Солина Н.И. Алгоритм расчета поправочных коэффициентов в режиме калибровки по высокой температуре на нейропроцессоре Л1879ВМ1. XI Международная конференция «Математика, компьютер, образование», г.Дубна, 26-31 января 2004 г.
- [8] Козелкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1985.–264с., ил.