

УДК 621.383

Алгоритмы цифровой обработки тепловизионных изображений в реальном времени на базе сигнальных процессоров «Мультикор»

К.О. Болтарь^{1,2}, Р.В. Грачев¹, В.В. Полунеев¹, В.С. Рудневский¹

Рассмотрены алгоритмы, используемые для обработки тепловизионных изображений, поступающих с матричных фотоприемных устройств (МФПУ) в реальном времени. Рассмотрены методы первичной и вторичной обработки. Изложены три метода контрастирования тепловизионных изображений. Приведены практические данные измерений производительности алгоритмов на примере блока электронной обработки (БЭО) на базе отечественного процессора серии «Мультикор».

PACS: 85.60.Bt

Ключевые слова: МФПУ, тепловизионное изображение, тепловизор, ИК-изображение, двухточечная коррекция, сигнальный процессор, DSP.

Введение

В настоящей статье рассматриваются алгоритмы, используемые для обработки тепловизионных изображений от матричного фотоприемного устройства (МФПУ) [1–3] в реальном времени с задержкой не более 20 мс. Приведены также данные о производительности этих алгоритмов. Рассматриваемые практические данные получены в блоке электронной обработки (БЭО) тепловизионных видеосигналов на базе процессора 1892BM5Я (ЦПОС-02), содержащего 2 ядра цифровых сигнальных процессоров (DSP) [4]. Блок подключен к МФПУ размером 256x256 элементов на основе фотодиодов КРТ спектрального диапазона 8–12 мкм [5]. Кадры с МФПУ поступают с частотой 50 Гц.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Грачев Роман Викторович, инженер¹.

Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист¹.

Рудневский Владимир Сергеевич, старший науч. сотр.¹

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2012 г.

© Болтарь К.О., Грачев Р.В., Полунеев В.В., Рудневский В.С., 2013

Обработка потока тепловизионных изображений, получаемых от МФПУ, необходима для решения следующих задач:

1. Устранение пространственной неоднородности характеристик изображения, связанной с неидеальностью элементов МФПУ.
2. Устранение дефектных точек (выбитых, нечувствительных элементов МФПУ).
3. Контрастирование изображения и регулировка уровня.

Таким образом, обработку тепловизионных изображений можно разделить на первичную (пункты 1, 2) и вторичную (пункт 3).

Кроме того, к обработке тепловизионных кадров относятся и процедуры калибровки, а именно, контрольные измерения характеристик элементов МФПУ, необходимые для уточнения коэффициентов, используемых при исправлении неоднородностей и поиска дефектных элементов. Однако эти процедуры, как правило, не требуют исполнения в режиме реального времени, и поэтому в рамках данной статьи рассматриваться не будут. Основные принципы калибровки МФПУ, применяемые в рассматриваемых БЭО, изложены в работе [6].

Схема обработки

Поскольку кадры, поступающие с частотой в 50 Гц, должны обрабатываться в реальном времени с задержкой не более 20 мс (что равно длительности приема 1 кадра целиком),

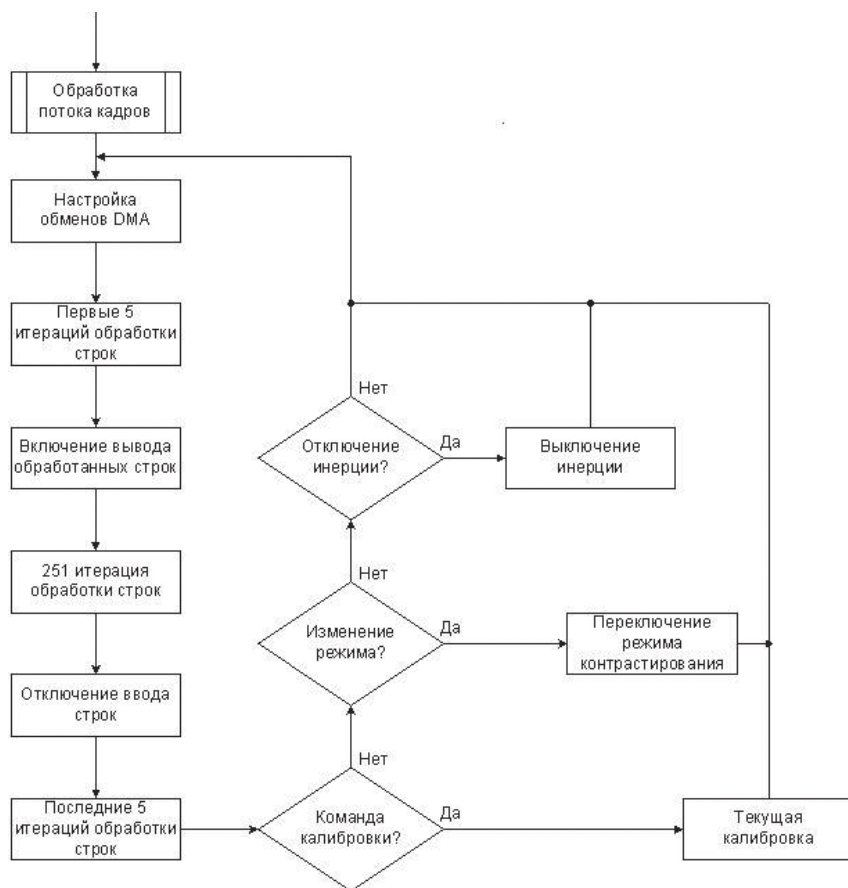


Рис. 1. Блок-схема обработки тепловизионного кадра

обработка должна осуществляться «в один проход» изображения, без возможности двух и более проходов по одному обрабатываемому кадру.

На рис. 1 приведена блок-схема обработки кадра.

Обработка происходит отдельно для каждой строки по мере их поступления в память процессора. При этом полный цикл обработки одной строки до вывода из устройства составляет 11 строковых синхроимпульсов, т.е. задержка на обработку относительно ввода составляет 0,6 мс.

Обработка каждой строки происходит по схеме, приведенной на рис. 2.

На рисунке обозначена схема обработки потока строк. В блоках на схеме присутствуют в общей сложности 5 строк, от $(i+2)$ до $(i-2)$, что иллюстрирует параллелизм обработки: пока по каналу DMA в DSP0 вводится $(i+2)$ -я строка, $(i+1)$ -я обрабатывается функцией двухточечной коррекции, i -я проходит процедуру исправления дефектных элементов, обновление гистограммы и контрастирование, затем передается в ядро DSP1, где в то же время обрабатывается медианным фильтром

$(i-1)$ -я строка. Параллельно из памяти ядра DSP1 выводится полностью обработанная $(i-2)$ -я строка.

Каждая из параллельных операций по обработке строк в ядрах DSP, включая их ввод и вывод в/из ОЗУ, осуществляется за время, не превышающее длительности одного строкового синхроимпульса. Таким образом, задержка на обработку строки без учета ввода и вывода составляет 5 строковых синхроимпульсов.

Первичная обработка

Коррекция неоднородностей каждой строки осуществляется по известной формуле двухточечной коррекции:

$$Fs_j = k_j x_j + b_j + L_m, \quad (1)$$

где x_j – входное значение, считанное с элемента МФПУ, k_j – коэффициент выравнивания чувствительности данного элемента, b_j – его постоянная составляющая, L_m – модификатор среднего уровня яркости изображения.

Исправление дефектных элементов осуществляется путем замены дефекта одним

из 28 способов (усреднением ближайших недефектных или одним ближайшим недефектным). Данная методика подробно рассмотрена в работе [7]. Ее реализация оказывает наиболее ощутимое влияние на производительность программы обработки.

Вторичная обработка

К вторичной обработке относятся операции построения гистограммы яркостей изображения, контрастирования изображения и медианной фильтрации кадра крестообразным окном 3×3 для удаления случайных всплесков яркости площадью не более 2 точек.

Построение гистограммы

Поскольку гистограмма яркостей может быть использована только после полного ее формирования, для контрастирования используются характеристики гистограммы, построенной при обработке предыдущего кадра.

Для построения гистограммы каждое значение яркости ограничивается диапазоном $[-2047; +2047]$. При этом, поскольку гистограмма используется только для вычисления ее границ и центра, для ускорения вычислений построение происходит с усреднением по 4 точки. Т.е. в гистограмму добавляется одна градация яркости для каждой четырех точек:

$$BG \left[\frac{Fs_j + Fs_{j+1} + Fs_{j+2} + Fs_{j+3}}{4} \right] + + \quad (2)$$

После участия в построении гистограммы все яркостные значения ограничиваются диапазоном $[G_{\min}; G_{\max}]$, то есть границами гистограммы, полученными при обработке предыдущего кадра (см. 2.3). Это ограничение применяется, только если используется нормализация или кусочно-линейное контрастирование изображения, для линейного режима ограничения не происходит.

Контрастирование

Контрастирование изображения при обработке тепловизионных кадров, поступающих в БЭО, должно решать две задачи:

1. преобразовывать входные 16-разрядные градации яркости в 12-разрядный формат, используемый при выводе изображения из БЭО;

2. так как при уменьшении разрядности очевидна потеря контрастности, необходимо перекеватование яркостных значений так, чтобы больше градаций приходилось на те диапазоны яркости, которые реально существуют в обрабатываемом кадре.

В БЭО на базе ЦПОС-02 реализовано 3 варианта (режима) контрастирования, переключаемых пользователем: линейное, кусочно-

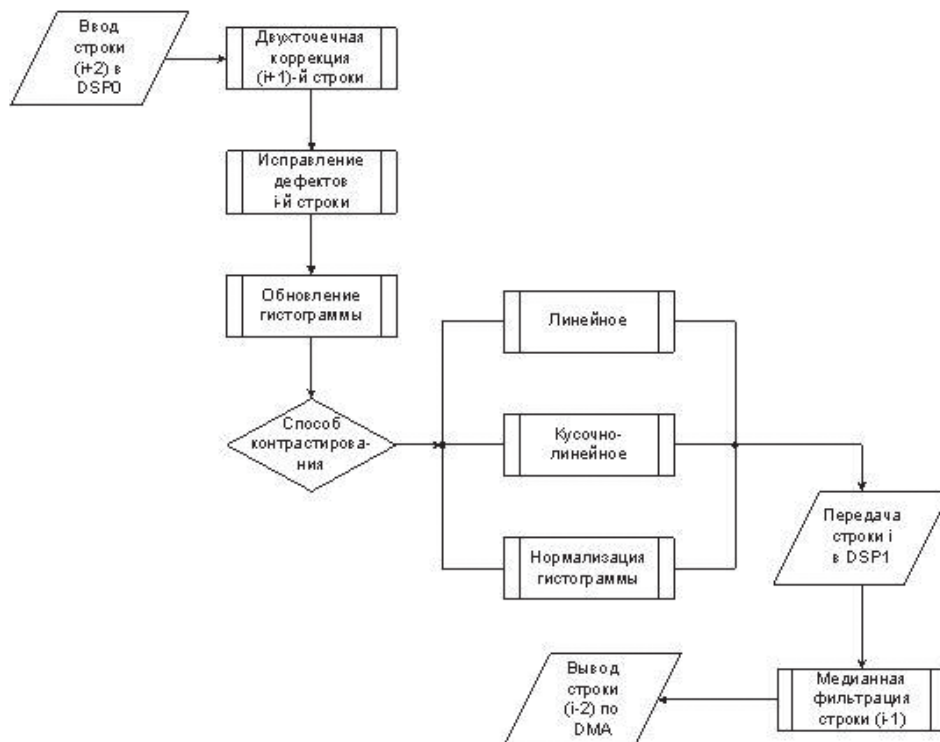


Рис. 2. Блок-схема обработки строк в ядрах DSP0 и DSP1

линейное и нормализация гистограммы.

В режиме *линейного контрастирования* над обрабатываемой строкой осуществляются следующие действия:

1. Данные умножаются на заданный пользователем коэффициент контрастирования;
2. Данные преобразуются к 12-разрядному неотрицательному виду (ограничиваются в диапазоне [0;4095]).

Контрастирование происходит по формуле:

$$y_j = \frac{x_j \cdot Ctr}{16} + 2048 \quad (3)$$

где x_j – входное значение яркости.

В режиме *кусочно-линейного контрастирования* данные преобразуются по рассматриваемому ниже алгоритму.

Определение параметров в положительном и отрицательном диапазонах относительной яркости происходит отдельно, одним и тем же способом, с использованием границ гистограммы. Алгоритм рассматривается на примере построения отрезков контрастирования в положительной области сигнала (в отрицательной области построение происходит аналогично). Сначала значение G_{max} раскладывается по формуле:

$$G_{max} = 128 \cdot 2^p + n, \quad p \geq 0, \quad n < 128 \cdot 2^p \quad (4)$$

Затем определяется значение Y_+ , т.е. количество точек в выходном диапазоне от нуля, в которые возможно осуществление переквантования исходных значений центральной области с коэффициентом $c_+ = 2^{-p}$. Значение Y_+ вычисляется по формуле:

$$Y_+ = 128 - \frac{n}{2^p} + 1 \quad (5)$$

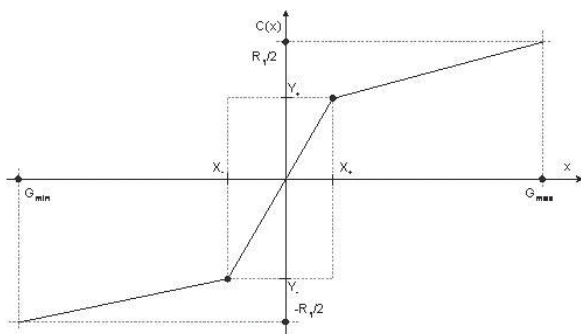


Рис. 3. Кусочно-линейное контрастирование с подстройкой параметров по гистограммным границам

Соответствующая точка во входном диапазоне X_+ определяется как:

$$X_+ = 2^p (Y_+ - 1) + 1 \quad (6)$$

Тогда параметры прямой, образующей второй отрезок контрастирования положительной области определяются следующей системой:

$$\begin{cases} c_{+1} = \frac{128 - Y_+}{G_{max} - X_+} \\ a_{+1} = Y_+ - c_{+1} X_+ \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициент контрастирования первого отрезка определяется как:

$$c_{+0} = \frac{1}{2^p} \quad (8)$$

В результате проведения аналогичных операций для отрицательной части преобразуемого диапазона определяется кусочно-линейная функция из четырех отрезков, по которой и будет осуществляться контрастирование (рис. 3).

Результирующая функция контрастирования описывается системой:

$$C(x) = \begin{cases} c_{-1}x + a_{-1}, & x < X_- \\ c_{-0}x & X_- \leq x < 0 \\ c_{+0}x & 0 \leq x \leq X_+ \\ c_{+1}x + a_{+1}, & x > X_+ \end{cases} \quad (9)$$

В процессе штатной обработки контрастирование осуществляется по указанной системе. Коэффициенты при этом обновляются после обработки каждого кадра по построенной в процессе гистограмме.

Контрастирование нормализацией гистограммы осуществляется по известной формуле (10), суть которой – в равномерном распределении реального диапазона яркостей по выходному диапазону (12 разрядов).

$$y_j = \frac{4096(x_j - G_{min})}{G_{max} - G_{min}} \quad (10)$$

Медианная фильтрация

Для исправления оставшихся после обработки кадра точечных дефектов (случайных шумовых выбросов) используется медианный фильтр с крестообразным окном 3×3 . Работа

фильтра заключается в замене каждой точки на значение медианы по указанному окну. Медианой называется средний (в данном случае – третий) из всех отсортированных по возрастанию яркости элементов данного окна.

Применение медианной фильтрации крестообразным окном 3×3 к тепловизионным кадрам позволяет удалить из изображения случайные шумовые выбросы площадью в 1 или 2 точки.

Медианная фильтрация – довольно требовательная к вычислительным ресурсам процедура, поэтому ее исполнение происходит в отдельном ядре DSP1 ЦПОС-02, в то время как в DSP0 обрабатывается следующая строка.

Пост-обработка

Пост-обработкой называются процедуры, связанные с обработкой гистограммы, построенной уже после обработки 256 строк кадра (по которым, собственно, гистограмма и строится). Пост-обработка гистограммы необходима для вычисления коэффициентов, которые будут использоваться для обработки следующего кадра.

Процедура пост-обработки запускается в ядре DSP0 после полного цикла обработки всех 256 строк кадра. В ходе пост-обработки осуществляются следующие действия:

- обход гистограммы, в процессе которого вычисляются ее минимальная и максимальная граница;

$$B_{max} = \sum_{i=\frac{R_0}{2}}^{G_{max}} G(i)$$

$$B_{min} = \sum_{i=-\frac{R_0}{2}}^{G_{min}} G(i) \quad (11)$$

здесь R – диапазон яркостей (равный 4096), B_{max} и B_{min} – пределы интегрирования гистограммы, устанавливаемые пользователем для определения границ.

- вычисление центра гистограммы, используемого для алгоритма коррекции среднего уровня. Центр гистограммы вычисляется как точка, слева и справа от которой находится одинаковое число яркостных реализаций.

- обнуление гистограммы в процессе обхода (для построения новой гистограммы при обработке следующего кадра);

- к вычисленным границам гистограммы применяется рекурсивный фильтр (с задаваемым пользователем коэффициентом инерции) для сглаживания эффектов, возникающих при резком изменении гистограммы кадра (смене наблюдаемой МФПУ сцены);

- вычисляются коэффициенты контрастирования, используемые в кусочно-линейном алгоритме;

- вычисляется модификатор среднего уровня L_m , применяемый в дальнейшем для автоматической регулировки среднего уровня яркости при использовании нормализации и кусочно-линейного алгоритма контрастирования. Коррекция среднего уровня необходима, т.к. средний тепловой фон среды при перемещении МФПУ может изменяться и для большей контрастности изображения его необходимо вычитать. Для создания инерции в изменениях модификатора среднего уровня также используется рекурсивный фильтр.

Производительность алгоритмов

Тактовая частота БЭО – 96 МГц. Тогда тактов на обработку одного кадра должно тратиться не более $96\,000\,000 / 50 = 1\,920\,000$ тактов/кадр.

В БЭО за время передачи одного кадра происходит ~ 300 строчковых синхроимпульсов. Тогда $1\,920\,000 / 300 = 6\,400$ тактов / строку. Учитывая накладные расходы, которые обычно принимаются за 10 %, остается 5760 тактов.

В характеристики производительности программ в ядре DSP0 не вошла процедура исправления дефектных элементов. Хотя она и оказывает существенное влияние на производительность системы, число дефектов от одного МФПУ к другому может быть разным. Поэтому имеет смысл измерить максимальное число дефектов на строке, которое можно исправить без нарушения режима реального времени.

Суммарное число тактов на обработку строки в DSP0 без учета исправления дефектов составляет 3178 тактов. Таким образом на обработку дефектов остается $5760 - 3178 = 2582$ тактов. Обработка каждого дефекта за-

Таблица

Характеристики производительности алгоритмов обработки в тактах на строку

Процедура	Тактов на обработку строки
DSP0	
Двухточечная коррекция	274
Построение гистограммы	1304
Контрастирование (максимально)	900
Передача данных в DSP1	350
Пост-обработка (среднее на строку)	350
Итого	3178
DSP1	
Прием данных из DSP0	350
Медианная фильтрация	4352
Итого	4702

нимает 26 тактов, т.о. в текущей версии ПО возможна обработка не более чем $2582 / 26 = 100$ дефектов за строку.

Очевидным недостатком такой системы можно считать случаи, когда в МФПУ на какой-либо из строк обнаруживается более 100 дефектных элементов. Для таких случаев в программе предусмотрена процедура исправления дефектной строки целиком – с заменой каждого элемента на усредненное значение трех элементов строки выше и трех элементов строки ниже данной. Однако такая упрощенная процедура в целом ухудшает качество изображения исправленной строки, так как уже не учитывает наличие дефектов в верхней и нижней строках.

Заключение

В работе рассмотрены алгоритмы, используемые для обработки тепловизионных изображений в реальном времени. Приведены практические данные производительности этих алгоритмов при их использовании для обработки тепловизионных кадров размером 256×256 элементов, поступающих с частотой 50 Гц. Показано, что отечественные процес-

соры ЦПОС-02 серии «Мультикор» способны справляться с таким потоком кадров и обрабатывать их с задержкой выходных данных относительно входных в 0,6 мс. Т.е. процессоры ЦПОС-02 могут быть использованы в современных тепловизионных системах для обработки изображений в реальном времени.

Литература

1. Катаев О.В., Петручук И.В., Трунов Г.Л., Соляков В.Н. // Искусственный интеллект. 2004. № 3. С. 459.
2. Соляков В.Н., Жегалов С.И., Сагинов Л.Д. и др. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 60.
3. Werner Gross, Thomas Hierl, Max Schulz. // Opt. Eng. 1999. V.38. No. 5. PP862
4. <http://multicore.ru/index.php?id=46>
5. Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов Е.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257.
6. Грачев Р.В. // Вопросы радиоэлектроники. 2008. Сер. ЭВТ. Вып. 3. С. 148.
7. Болтарь К.О., Грачев Р.В., Полунеев В.В. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 42.

Digital signal processing algorithms for real-time infrared imagery processing using “Multicore” series DSP

K.O. Boltar, R.V. Grachev, V.V. Poluneev, and V.S. Rudnevsky

Orion R&P Assocoation, Inc.
46/2 Enthusiastov highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

In this paper, the algorithms for infrared imagery processing are presented, including both primary processing (two-points-correction and bad pixels validation) and secondary processing (bar graph building, contrast enhancing, level adjustments, median filtration). The algorithms are used to process IRFPA frames in real-time mode, with the delay of no more than 20 ms relative to each frame input start point. The measurements of algorithms efficiency are presented. As an example and a model for measurements we use a processing block based on CPOS-02 VLSIC with two DSP and one RICS cores on chip. The block is attached to IRFPA with 256x256 matrix of elements made from HgCdTe. Infrared frames input goes with 50 Hz frequency.

PACS: 85.60.Bt

Keywords: FPA, thermal image, thermal imager, IR image, point-to-point correction, signaling processor, DSP.

Bibliography — 7 references

Received September 15, 2012