

Цифровая обработка сигнала микроболометра

Владимир Семёнов (г. Великий Новгород)

В статье рассматриваются особенности формирования сигнала в микроболометрах, а также различные методы маскировки дефектных пикселей, возникающих в микроболометрических датчиках тепловизионных приборов.

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные датчики изображения являются основой для построения современных телевизионных камер. К видеодатчикам относятся приборы с зарядовой связью (ПЗС) и КМОП. Человеческий глаз воспринимает электромагнитное излучение с длиной волны 0,4...0,7 мкм, тогда как диапазон чувствительности видеодатчиков КМОП простирается в невидимую, инфракрасную область.

Для наблюдения используется собственное излучение предмета или субъекта в инфракрасной области спектра электромагнитного излучения. Согласно закону смещения Вина, максимум излучения тела, нагретого до температуры T , в градусах Кельвина, имеет длину волны в мкм [1] $\lambda = 2898/T$. Соответственно, для тела, нагретого до температуры 310 К (37°C), максимум излучения соответствует длине волны 9,3 мкм, поэтому для обнаружения излучения от естественных объектов необходим видеодатчик, чувствительный к длинам волн от 14 мкм (207 К \approx -70°C) до 7 мкм (414 К \approx 140°C).

Приборы, обеспечивающие формирование тепловизионного изображения, называются тепловизорами. Тепловизионное изображение формируется в виде раstra, т.е. попиксельно, аналогично телевизионному изображению. Уровень сигнала каждого пикселя тепловизионного датчика определяется интенсивностью теплового излучения. Таким образом, можно наблюдать распределение температур в плоскости изображения объекта.

Тепловизоры применяются не только при наблюдении в ИК-лучах в системах безопасности и наведения. В медицине они используются для ранней диагностики онкологических за-

болеваний, поскольку опухоль имеет температуру, отличающуюся от температуры окружающей ткани. В машиностроении перегрев отдельных узлов оборудования часто является предвестником неисправности. В энергетике тепловизоры позволяют определять состояние силовых трансформаторов, контактных соединений линий электропередачи и т.п. на расстоянии, что позволяет заблаговременно принять меры для предотвращения аварии. При разработке и производстве радиоэлектронной аппаратуры тепловизоры позволяют контролировать перегрев элементов электронного устройства, обеспечивая надёжность функционирования аппаратуры. В городском хозяйстве тепловизоры позволяют обнаруживать места утечки тепловой энергии даже с вертолёта, что позволяет оперативно принимать меры для их устранения.

БОЛОМЕТРЫ

Для измерения мощности излучения часто используют болометр – измерительный элемент, изменяющий температуру под воздействием падающего на него излучения [2]. Чувствительный слой болометра обычно выполняется в виде металлической или полупроводниковой плёнки, образующей резистивный элемент. Как правило, болометр содержит два термочувствительных сопротивления, одно из которых облучается потоком лучистой энергии, а второе компенсирует изменение температуры внешней среды. Для повышения чувствительности болометр иногда охлаждают до температуры жидкого азота (-196°C).

Микроболометр представляет собой микросхему, объединяющую на одном кристалле термочувствительные эле-

менты и схему предварительной обработки сигнала, преобразующую изменения сопротивления в выходное напряжение и компенсирующую фоновое излучение. Микроболометр в качестве твердотельного датчика теплового излучения является основой при построении тепловизоров.

Из-за большого отличия в длине волны и оптика, и датчики изображения значительно отличаются от используемых в телевизионных камерах видимого спектра. Для формирования изображения на чувствительной поверхности матрицы применяется специальная, обычно германиевая оптика. В качестве чувствительного материала при изготовлении микроболометров используется оксид ванадия и аморфный кремний.

Сопротивление полупроводникового болометра изменяется по закону $R_T = R_\infty \exp(\Delta E/kT)$, где R_∞ – константа, соответствующая виртуальному сопротивлению при бесконечной температуре (практически значение при $T \gg \Delta E/k$), Ом; ΔE – ширина запрещённой зоны полупроводника, эВ; k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура в градусах Кельвина.

Отметим, что относительное изменение сопротивления полупроводникового болометра под воздействием теплового излучения $\Delta R/R \approx \Delta T/T$ составляет всего 0,03% при изменении температуры болометра на 0,1 К (при комнатной температуре). Поэтому для формирования сигнала в микроболометрах применяется специальная схемотехника.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА В МИКРОБОЛОМЕТРАХ

В настоящей статье мы ограничимся рассмотрением вопросов, связанных с обработкой сигнала микроболометрического датчика с организацией считывания, аналогичной видеодатчикам КМОП. Считывающая схема микроболометра изображена на рисунке 1.

Параметром, несущим информацию о температуре, является сопротивление резистора (болометра). Сопротивление преобразуется в пропорциональный ток с помощью схемы с общим затвором на n-канальном МОП-транзисторе, смещение на затворе которого обозначено U_{refa} . Для компенсации неинформативной составляющей используется комплементарный каскад – схема с общим затвором на p-канальном МОП-транзисторе, смещение на затворе которого обозначено U_{refb} . Комплементарная схема с последовательным включением транзисторов питается от напряжения +E. Разностный ток этой схемы преобразуется в напряжение с помощью интегратора со сбросом. Изменяя напряжения смещения U_{refa} и U_{refb} , можно регулировать накапливаемый заряд. Поскольку напряжения смещения и питания непосредственно определяют ток сигнала, они должны быть хорошо отфильтрованы.

Сопротивление активного болометра R_a зависит от температуры. Оно может быть представлено в виде $R_a = R_0 + \Delta R + K_T \Delta T$, где R_0 – номинальное сопротивление болометра; ΔR – технологическое отклонение сопротивления активного болометра от номинального значения; $K_T = \Delta R / \Delta T$ – температурный коэффициент сопротивления материала болометра; ΔT – отклонение температуры болометра под воздействием внешнего излучения.

Здесь и далее нижним индексом 0 будут отмечаться номинальные значения того или иного параметра, буквой Δ – абсолютные отклонения параметра от его номинального значения, буквой δ – относительные.

Полезный сигнал (ток, содержащий информацию о температуре) формируется посредством схемы с общим затвором на n-канальном МОП транзисторе, к истоку которого подключён болометр:

$$I_a = U_a / R_a,$$

где $U_a = U_{refa} - U_{gs}$, $I_a \approx I_0(1 + \delta U_a + \delta R + \delta T)$, $I_0 = U_a / R_0$, $\delta U_a = \Delta U_a / U_{a0}$ (определяется технологическим разбросом напряжения между затвором и истоком U_{gs} при токе I_0), $\delta R = \Delta R / R_0$, $\delta T = ST \Delta T / R_0$. При этом $\delta R < 0,05$, $\delta T \ll \delta R$.

Иными словами, информационная составляющая, пропорциональная температуре, δT , много меньше составляющей, обусловленной техно-

логическим разбросом δR , и чрезвычайно мала по отношению к фоновой составляющей I_0 .

Для компенсации фоновой составляющей используется микроболометр R_b . Схема с общим затвором на p-канальном МОП-транзисторе формирует компенсирующий ток I_b . Номинальное значение этого тока также равно I_0 , поэтому можно записать по аналогии:

$$I_b = U_b / R_b \approx I_0(1 + \delta U_b - \delta R_b),$$

$$U_b = E - U_{refb} - U_{gs}.$$

Подбором напряжений смещения можно уравнивать компенсирующий ток и фоновую составляющую $I_b = I_0$ с некоторой погрешностью ΔI : $I_b = I_0 - \Delta I$. Тогда ток, заряжающий конденсатор интегратора, $I = I_a - I_b \approx I_0(\delta U_a + \delta R + \delta T) - \Delta I$. После накопления в течение времени интеграции (например, одной строки) T_1 выходной сигнал при опросе одной ячейки микроболометра равен (мы пренебрегли знаком и постоянным смещением сигнала) $U_{out} = IT_1 / C$.

В идеальном случае равенства всех параметров номинальному значению получим $U_{out0} = I_0 \delta T t_1 / C_0 = U_T$, т.е. отклонение напряжение на выходе строго пропорционально изменению температуры. В реальности имеем:

$$U_{out} = [I_0(\delta V_a + \delta R + \delta T) - \Delta I] t_1 / C_0(1 + \delta C)$$

и погрешность преобразования

$$U_{out} - U_{out0} = U_{add} + UT \delta C, \text{ где } U_{add} = [I_0(\delta U_a + \delta R + \delta T) - \Delta I] t_1 / C_0.$$

В последнем выражении мы пренебрегли ошибкой формирования временного интервала t_1 , поскольку полагаем, что для его формирования используется высокостабильный кварцевый генератор.

Таким образом, выходной сигнал микроболометра содержит три составляющие:

- $U_{out} = U_{add} + (1 + K)U_T$, где U_{add} – некомпенсированный остаток фона (аддитивная погрешность);

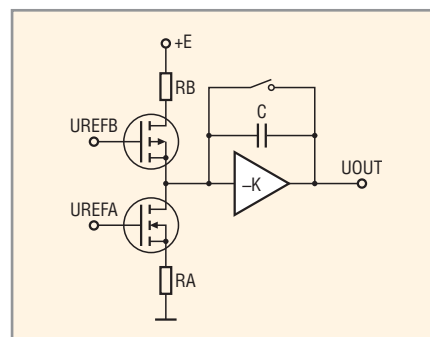


Рис. 1. Считывающая схема микроболометра

- K – неравномерность чувствительности (мультипликативная погрешность);
- $U_T = (U_{out} - U_{add}) / (1 + K)$ – информационная составляющая.

ОБРАБОТКА СИГНАЛА МИКРОБОЛОМЕТРА В СИГНАЛЬНОМ ПРОЦЕССОРЕ

Очевидно, что полезный сигнал микроболометра замаскирован паразитным сигналом, связанным как с методом формирования сигнала, так и с технологическими погрешностями изготовления датчика. Поэтому перед подачей такого сигнала на устройство отображения его необходимо обработать для компенсации этого паразитного сигнала. Структурная схема цифрового сигнального процессора, выполняющего такую обработку, показана на рисунке 2. Выходной сигнал микроболометра оцифровывается аналого-цифровым преобразователем. Вследствие высоких требований к точности цифровой обработки решающая способность аналого-цифрового преобразования должна соответствовать не менее чем 14 двоичным разрядам (часто применяют 16-разрядное преобразование).

При обработке сигнальным процессором первая составляющая должна быть вычтена из выходного сигнала микроболометра, а вторая – скомпенсирована умножением на коэффициент, постоянный для данного столбца. Определение корректирующих поправок выполняется во время

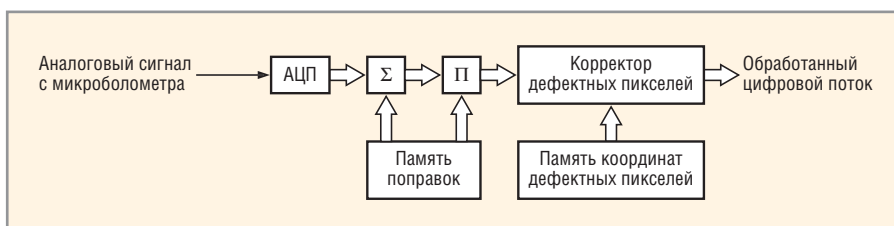


Рис. 2. Структурная схема цифрового сигнального процессора для обработки сигнала микроболометра



Рис. 3. Дефектные пиксели на изображении, получаемом с микроболметра

калибровки по равнотемпературно-му полю. Поскольку у нас имеется два неизвестных параметра, то для их определения требуется калибровка по меньшей мере при двух значениях температуры.

Таким образом, первая ступень сигнального процессора должна содержать сумматор и множитель на коэффициент, опирающийся на таблицу поправок, сформированную при калибровке (см. рис. 2).

Особую проблему представляют «плохие» или дефектные пиксели, т.е. пиксели, сигнал которых не соответствует падающему на него тепловому излучению. Эти пиксели могут иметь различный вид: белые и чёрные «мёртвые» точки, мерцающие точки, точки с пониженной чувствительностью (см. рис. 3). Кроме того, возможны протяжённые кластеры плохих пикселей, коррекция которых особенно сложна. В отличие от телевизионных видеодатчиков, где наличие нескольких дефектных пикселей является основанием для отбраковки датчика, в тепловизионных датчиках допускаются сотни и тысячи плохих пикселей (см. рис. 3), которые должны быть скомпенсированы путём обработки изображения. Это делает выявление и коррекцию плохих пикселей достаточно сложной задачей, которую решает вторая ступень сигнального процессора (см. рис. 2).

При обработке сигнала микроболметра информация плохих пикселей должна быть интерполирована, т.е. заменена другим значением, производным от значений соседних пикселей. Такая замена может быть статической или динамической. В первом случае плохие пиксели выявляются на этапе калибровки прибора. Их координаты заносятся в специальную таблицу, которая является справочной для работы коррек-

тора плохих пикселей. При динамической замене коррекция выполняется в процессе работы прибора. Преимуществом этого метода является возможность коррекции плохих пикселей, появляющихся в процессе эксплуатации. Однако такие корректоры значительно сложнее, поскольку требуют включения в их состав детекторов плохих пикселей, работающих с сигналом произвольного сюжета.

СТАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ДЕФЕКТНЫХ ПИКСЕЛЕЙ

Коррекция плохих пикселей осуществляется в два этапа: 1) выявление плохого пикселя, 2) замена значения пикселя. Для выявления плохого пикселя должен быть выбран критерий, отличающий плохой пиксель от хорошего. Как правило, это определённое отличие от уровня соседних пикселей при наблюдении равнотемпературного поля. Например, пиксель объявляется плохим, если после компенсации технологических погрешностей отличается от соседних более чем на 50% от динамического диапазона.

При статической компенсации выявление плохих пикселей выполняется в результате обработки сигнала равнотемпературного поля в компьютере. Компьютерное моделирование алгоритмов, «защитных» в корректоре дефектов, позволяет оператору сразу оценить возможности их компенсации, и при необходимости координаты плохих пикселей, не соответствующих назначенному критерию, передаются обратно в память сигнального процессора тепловизора.

Все алгоритмы замены используют интерполяцию сигналов соседних элементов по тому или иному закону. Наиболее простой из них – замена значением сигнала от ближайшего хорошего пикселя. Например, это может быть предыдущий пиксель. К сожалению, такое простое в реализации решение (достаточно иметь задержку на элемент) не эффективно для протяжённых дефектов. В этом случае может быть применена корректирующая таблица, где указывают хороший пиксель, значение которого должно быть подставлено вместо значения плохого пикселя. Критерием выбора подставляемого пикселя может быть минимум расстояния до корректируемого плохого пикселя.

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПЛОХИХ ПИКСЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Тёмные и белые «мёртвые» точки (см. рис. 3) очень похожи на шум видеодатчиков при низком, менее 20 дБ, отношении сигнал-шум или шум, обусловленный ошибками в цифровом канале передачи. Так же, как и шум, дефекты проявляются в виде разрозненных изменений изолированных элементов изображения, не обладающих пространственной корреляцией. Дефектные элементы существенно отличаются от соседних, аналогично элементам, искажённым шумовыми выбросами. Соответственно, для их динамической компенсации применимы методы фильтрации шума на изображении [3].

Рассмотрим использование метода свёртки со сглаживающим массивом. При этом массив Q выходного изображения размером $M \times M$ формируется путём дискретной свёртки массива F размера $N \times N$ исходного изображения со сглаживающим массивом H размером $L \times L$ согласно формуле:

$$Q(m_1, m_2) = \sum_{n_1} \sum_{n_2} F(n_1, n_2) H(m_1 - n_1 + 1, m_2 - n_2 + 1).$$

Сглаживание шума обеспечивается низкочастотной фильтрацией с помощью массива H с положительными элементами, называемого также шумоподавляющей маской.

При использовании маски с равными элементами производится подстановка среднего значения сигнала соседних пикселей в пределах скользящей апертуры, поэтому иногда этот метод называется методом скользящего усреднения. Усреднение ведёт к ухудшению резкости («замыливанию») изображения; дефекты же, превышающие по размеру апертуру 5×5 , не компенсируются.

Лучшие результаты могут быть получены при использовании маски с неравными элементами, например, уменьшающимися по мере удаления от центрального элемента маски по нормальному закону распределения.

Применение упомянутых методов приводят к искажению границ наблюдаемых объектов. От этого недостатка в значительной степени свободен метод двумерной медианной фильтрации [3].

Медианная фильтрация является нелинейной процедурой, использующей построение вариативного ряда из значений элементов апертуры – конфигурации пикселей, используемых при фильтрации. Наиболее часто используются следующие формы апертуры (число элементов в апертуре должно быть нечётным): горизонтальный и вертикальный отрезки, квадрат и крест.

Фильтрации подвергается центральный элемент апертуры. Все элементы, входящие в апертуру, с помощью процедуры сортировки выстраиваются в вариационный ряд в порядке нарастания их значений $V_{min}, \dots, V_{med}, \dots, V_{max}$ и значение V_{med} присваивается центральному элементу. Для точечного дефекта применение любой из перечисленных апертур приведёт к тому, что дефектный пиксель окажется на краю вариационного ряда и будет заменён медианным значением. Ситуация усложняется для протяжённого дефекта. Например, для дефекта в виде горизонтального линейного сегмента будет эффективным использование апертуры в виде вертикального линейного сегмента.

Для дефекта в виде квадрата 2×2 будет эффективной фильтрация квадратом 3×3 . В общем случае для фильтрации протяжённого дефекта прямоугольной формы, содержащего $L \times M$ элементов, необходима апертура, содержащая не менее $2L \times M + 1$ элементов.

Использование больших апертур приводит к заметным искажениям изображения. При этом становится целесообразным применение метода динамической апертуры, при котором форма апертуры может быть изменена для различных зон изображения. В зонах расположения протяжённых дефектов используется апертура большего размера и специально подобранной формы, в то время как для большей части изображения используются простые апертуры (линейный сегмент или крест), позволяющие эффективно фильтровать одиночные дефекты без видимых искажений изображения.

Весьма эффективным является метод, описанный в [3]. Если значение данного элемента превышает среднее значение группы на некоторую пороговую величину, значение элемента заменяется средним значением по группе. При этом хорошие пик-



Рис. 4. Результаты обработки усредняющим фильтром с порогом определения дефекта

если корректировке не подлежат и сохраняют свои первоначальные значения. Подбором порога можно добиться компромисса между заметностью не скомпенсированных дефектов и искажениями изображения. Результаты применения этого метода при размере апертуры 5×5 и пороге, равном 5, показаны на рисунке 4.

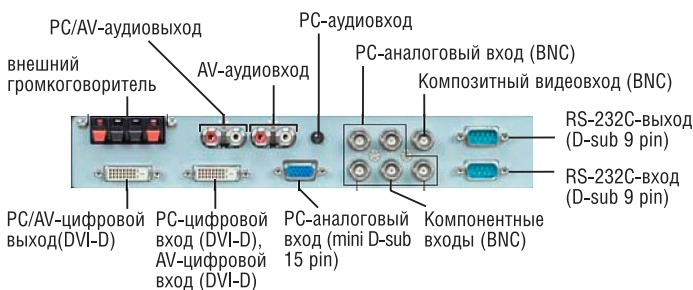
ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Ишанин Г.Г. и др. Источники и приёмники излучения. СПб: Политехника, 1991.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.



**КРУГЛОСУТОЧНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ – 24/7
Full HD профессиональных мониторов
(46 - 65 дюймов)**

- **Разрешение экрана Full HD 1920x1080**
фирменная технология ASV Black TFT
- **Разработано для коммерческой эксплуатации**
впервые безвентиляторное охлаждение, работа 24/7
- **Простота обслуживания**
удаленная диагностика через порт RS-232C
- **Полный комплект коммерческих приложений**
изменение размера изображения: видеостены, PIP, PbyP



PROSOFT®

ПРОСОФТ – официальный дистрибьютор компании SHARP в России и странах СНГ

Тел.: (495) 232-2522 • E-mail: info@prochip.ru • www.prochip.ru