

4. Бусурин, В. И. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Ермаков, О. Прикладная оптоэлектроника / О. Ермаков. – М.: Техносфера. – 2007. – 414 с.
6. Тёрнер, Э. Бисенсоры: основы и приложения. Пер. с англ. / Э. Тёрнер, И. Карубе., Дж. Уилсон. – М.: Мир. – 1992. – 588 с.

Надійшла до редакції
31 березня 2015 року

© Худякова Л. О., Сташкевич В. Ф., Кусик К. В., 2015

УДК 615.84:615.472.03:615.847.8

МЕТОД БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Шлыков В. В., Данилова В. А.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
г. Киев, Украина
E-mail: valnaa@ukr.net

В работе проанализирована проблема подавления шумов в ИК-изображениях. Одной из проблем является зашумление полезного сигнала при работе матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Возможности подавления геометрических шумов рассматриваются как на аппаратном, так и на программном уровне. В настоящей работе сделан акцент на борьбу с геометрическими шумами на программном уровне.

Сущность реализованного метода состоит во введении двумерного малоамплитудного сканирования со специально подобранным законом, по которому матрица ФПЭ смещается относительно изображения, регистрации соответствующей последовательности кадров и их цифровая обработка. Именно двумерное сканирование позволяет решить проблему безэталонного подавления геометрического шума по сигналам сцены.

Ключевые слова: матричные фотоприемные устройства, геометрический шум, ИК-изображение, термография.

Введение

Системы технического зрения используются для определения пространственного положения, формы, параметров движения различных объектов, часто в сложных эксплуатационных условиях (высокая температура, большая влажность и т.д.). Системы для научных исследований и медицины должны, как правило, обладать высоким пространственным (форматы до 5000x5000 элементов) и энергетическим (до 16 бит) разрешением и иметь малый уровень собственных шумов.

Большинству ИКС свойственно хорошее энергетическое, пространственное, спектральное и временное разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое или полуавтоматическое распознавание и идентификацию различных источников излучения на больших дальностях при наличии помех. В таких системах эффективно используются различия в характере собственного и отраженного оптического излучения разных объектов в различных спектральных диапазонах.

Одной из проблем является зашумление полезного сигнала при работе матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Возможности подавления геометрических шумов рассматриваются как на аппаратном, так и на программном уровне. В настоящей работе сделан акцент на борьбу с геометрическими шумами на программном уровне.

Обзор проблемы искажений в ИК-изображениях

Основной проблемой является зашумление полезного сигнала при работе матричных фотоприемных устройств (МФПУ), причины которого кроются в: дискретной природе вещества, из которого сделаны фотоприемные элементы (ФПЭ) матрицы (разброс характеристик ФПЭ, далее – геометрические шумы); зернистости матрицы (битые пиксели); излучении (атомы, фотоны); тепловом движении частиц (быстрые флуктуации относительно среднего значения сигнала)[1]; недостаточной коррекции неоднородности ФПЭ сканирующей матрицы и, как следствие, нарушение точности восстановления изображений.

Известные достоинства неохлаждаемых тепловых многоэлементных приемников излучения (МПИ) – микроболометров сопровождаются рядом недостатков, ограничивающих круг применений этих приемников. К числу последних относится наличие теплового шума Джонсона, избыточного токового $1/f$ -шума, а также возникновение джоулева нагрева чувствительных элементов, проявляющегося в появлении тока смещения измерительной схемы [4].

Стимулируют интерес к системам визуализации ИК-изображений, в которых применяются оптические методы считывания вместо обычных для микроболометров схем считывания и накопления зарядов, возникающих в отдельных пикселях МПИ, следующие технические решения:

- повышение геометрического и энергетического (температурного) разрешения ИКС, которые используют неохлаждаемые приемники излучения,
- повышение их пороговой чувствительности и приближение ее значения к величинам, характеризующих энергетическое разрешение фотонных ФПУ,
- уменьшение их размеров, массы и потребляемой мощности,
- увеличение быстродействия ИКС,
- снижение их стоимости.

Традиционный подход к подавлению геометрических шумов в работе МФПУ связан с использованием эталонных площадных излучателей, дающих достаточно высокую по полю зрения однородность интенсивности излучения.

Это реализуется следующим образом: регистрируются два эталонных изображения с различными интенсивностями, по ним в линейном приближении для каждого ФПЭ вычисляются поправочные коэффициенты (мультипликативные и аддитивные), которые запоминаются в памяти вычислительного устройства и далее используются для цифровой коррекции сигналов сцены.

Сущность реализованного метода состоит во введении двумерного малоамплитудного сканирования со специально подобранным законом, по которому

матрица ФПЭ смещается относительно изображения, регистрации соответствующей последовательности кадров и их цифровая обработка.

Технические средства измерения температуры

С помощью детекторов ИКТ можно получить значительную информацию о слабо нагретых объектах. Так, спектральная длина волны теплового излучения человека с температурой 37°C составляет примерно 9,3 мкм. Детекторы ИКТ используют, как правило, длины волн, лежащие в окнах прозрачности атмосферы - в диапазоне 3 - 5 мкм (MIR) и 8 - 14 мкм (FIR) [4].

Инфракрасные камеры воспроизводят образ теплового объекта по сигналам от первичных преобразователей - датчиков теплового излучения. Выделяются два наиболее широкие классы тепловых камер: с не охлаждаемыми (Uncooled Focal Plane Array - UFPA) и охлаждаемыми (Cooled FPA) детекторами [5]. Тепловые приемники ИКТ поглощая фотоны, меняют температуру материала детектора и за счет этого - его свойства, что позволяет сгенерировать электрический сигнал. Материалы фотонных детекторов включают силицид платины PtSi, а также недорогие полупроводниковые устройства на основе материалов InSb, InAs, теллуриды кадмия и ртути HgCdTe или CdHgTe (КРТ), сульфидно-свинцовые PbS, селенидно-свинцовые PbSe и другие материалы [6] (рис. 1).

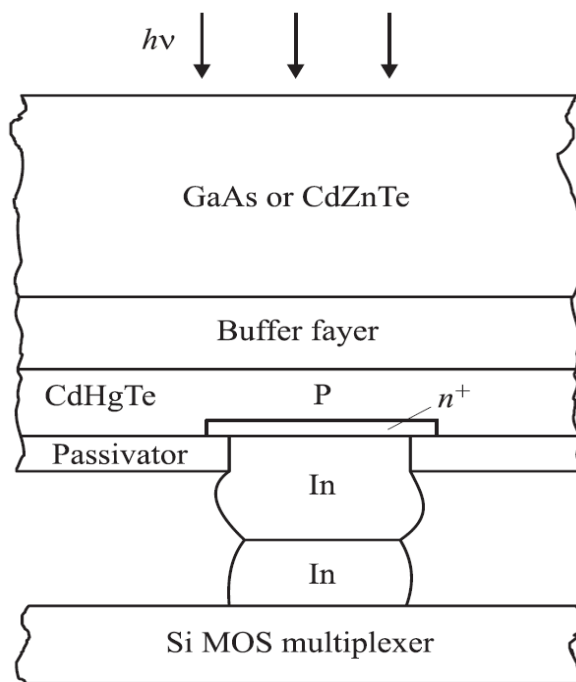


Рис. 1. Структура фоточувствительного элемента

Подход к подавлению аппаратных шумов

Основными видами шума рассматриваемого ФПУ являются тепловой шум, вызванный флуктуациями температуры приемника и шум схемы оптического считывания. Величина эквивалентной шуму разности температур, определяе-

мая первой из этих составляющих, может быть рассчитана по формуле [1, 2]:

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{8 K^2 T \sqrt{k G \Delta f}}{\tau_0 \beta A_{\text{пн}} \alpha (\Delta \Phi / \Delta T)_{\Delta \lambda}},$$

где K – диафрагменное число объектива, строящего изображение на ФПУ, T – температура элемента ФПУ, k – постоянная Больцмана, G – коэффициент теплопроводности, Δf – ширина полосы пропускания частот, τ_0 – коэффициент пропускания оптической системы (объектива), β – коэффициент заполнения пикселями чувствительного слоя приемника, $A_{\text{пн}}$ – площадь чувствительного элемента МПИ, α – коэффициент поглощения излучения чувствительным слоем МПИ, $\Delta \Phi / \Delta T$ – изменение потока, испускаемого черным телом – аналогом наблюдаемого излучателя, на единицу площади при температуре T внутри спектрального рабочего диапазона $\Delta \lambda$.

При значениях ожидаемых параметров системы на базе KLTN, а именно:

$G=1,6 \cdot 10^{-7}$ Вт/К и $5,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/К для пикселей с шагом 50 мкм и 25 мкм, соответственно, что соответствует тепловой постоянной времени 10 мс в общих случаях; коэффициентах заполнения $\beta=0,96$ для пикселей с шагом 50 мкм и 0,92 для пикселей с шагом 25 мкм;

$$\alpha=0,8; \tau_0=0,9; \Delta f=25 \text{ Гц};$$

значения $\Delta \Phi / \Delta T$, вычисленного для спектрального диапазона 8...12 мкм и температуры 293 К, было получено температурное разрешение (ЭШРТ) $\Delta T_{\text{п}}=5$ мК для шага пикселей 50 мкм и $\Delta T_{\text{п}}=12$ мК для шага пикселей 25 мкм.

Эти значения $\Delta T_{\text{п}}$ могут быть улучшены за счет снижения теплоемкости пикселей путем использования поглощающего слоя с лучшей проводимостью, например Au вместо SiN, что увеличит α с одновременным уменьшением теплоемкости. Кроме того можно уменьшить поперечное сечение волноводов, связывающих лазер с пикселями ФПУ.

Шумы схемы оптического считывания могут появиться из-за флуктуаций интенсивности считывающего лазерного пучка лучей, а также из-за шума в ПЗС считывания, который весьма невелик.

При сильном электрическом поле полный диапазон выходных сигналов соответствует малому диапазону температур пикселей T (порядка 1 К). При значительном диапазоне T возможно превышение фазового сдвига φ величины π , т.е. возникновение фазовой неопределенности, приводящей к неоднозначности значений выходного сигнала относительно T . Для исключения такого положения возможно реализовать дополнительное считывание с низкой разрешающей температурной способностью, которое выполняется под воздействием небольшого электрического поля. Это позволяет перекрыть считыванием большой интервал температур пикселей с однозначным их соответствием выходным сигналам. Связав результаты основного и дополнительного считывания, можно избавиться от фазовой неопределенности.

Стремление избавиться от перечисленных выше недостатков микроболометрических ФПУ, а также возможность использовать их для считывания сигналов с пикселей ФПУ кремниевых интегральных схем, позволяет использовать

термооптический эффект в полупроводниковых ФПУ. Технологию считывания сигналов с пикселов ФПУ на основе термооптического эффекта предложили разработчики компании Aegis Semiconductor Inc., вместо терморезистивного или пироэлектрического эффектов, которые используются в настоящее время в микроболометрах[2].

Подход к подавлению геометрических шумов

Традиционный подход к подавлению геометрических шумов в работе МФПУ связан с использованием эталонных площадных излучателей [3], дающих достаточно высокую по полю зрения однородность интенсивности излучения. Это реализуется следующим образом: регистрируются два эталонных изображения с различными интенсивностями, по ним в линейном приближении для каждого ФПЭ вычисляются поправочные коэффициенты (мультипликативные и аддитивные), которые запоминаются и далее используются для цифровой коррекции сигналов сцены. Этот подход не лишен недостатков, которые связаны со следующим:

- необходимость использования эталонных излучателей (как минимум двух);
- высокие требования к их однородности по полю зрения;
- необходимость использования в процессе калибровки набора эталонных излучателей, если динамический диапазон сигналов достаточно велик или существенно меняется в пространстве или во времени;
- неадаптивный в целом характер процедуры привязан как к характеристикам регистрируемой в динамике сцены, так и к характеристикам матрицы ФПЭ, которые также могут меняться во времени.

Предлагается новый подход к подавлению геометрического шума. Сущность реализованного метода состоит во введении двумерного малоамплитудного сканирования со специально подобранным законом, по которому матрица ФПЭ смещается относительно изображения. При смещении матрицы ФПЭ выполняется регистрация соответствующей последовательности кадров и их цифровая обработка. Идея модуляции тех или иных параметров системы (или сигнала) с целью ее идентификации уже реализовывалась другими исследователями, но, как показано в [6] и подтверждено в численных экспериментах [4,5], именно двумерное сканирование позволяет решить проблему безэталонного подавления геометрического шума по сигналам сцены.

Исходным материалом является квадратная матрица ФПЭ с числом элементов в строке (столбце) $N = 2^M$ и в линейном приближении оцифрованный сигнал $A_{i,j}$ от (i, j) -го ФПЭ:

$$A_{ij} = g_{ij}I_{ij} + h_{ij} + e_{ij}(t),$$

где I_{ij} – интенсивность излучения, падающего на ФПЭ,

h_{ij} , g_{ij} – коэффициенты преобразования (в данной работе $g_{ij} = 1$),

$e_{ij}(t)$ – случайная составляющая сигнала (шум).

Сканирование выполняется дискретно: на пиксель вниз-вверх и пиксель вправо-влево относительно исходного положения с достаточно малыми промежутками времени.

Регистрируем полученные кадры в виде системы:

$$\begin{cases} (F_{0,0})_{ij} \equiv A_{ij} = I_{ij} + h_{ij} + e_{ij}(t_1), \\ (F_{1,0})_{ij} \equiv B_{ij} = I_{i+1,j} + h_{ij} + e_{ij}(t_2), \\ (F_{0,1})_{ij} \equiv C_{ij} = I_{i,j+1} + h_{ij} + e_{ij}(t_4), \\ (F_{0,0})_{ij} \equiv A_{ij} = I_{ij} + h_{ij} + e_{ij}(t_3), \end{cases} \quad 1 \leq i, j \leq N,$$

где $e_{ij}(t_1)$, $e_{ij}(t_2)$, $e_{ij}(t_3)$, $e_{ij}(t_4)$ – случайные величины, которые имеют нулевые средние значения.

В каждом цикле сканирования учитывается, что случайные величины $e_{ij}(t_1)$, $e_{ij}(t_2)$, $e_{ij}(t_3)$, $e_{ij}(t_4)$ не коррелированы и имеют нулевые средние значения, а матрицы $[I_{ij}]$ и $[h_{ij}]$ на протяжении цикла сканирования остаются неизменными. В результате можно сформировать систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{ij} + h_{ij} = A_{ij}, \\ I_{i+1,j} + h_{ij} = B_{ij}, \\ I_{ij} + h_{ij} = A_{ij}, \\ I_{i,j+1} + h_{ij} = C_{ij}, \end{cases} \quad 1 \leq i, j \leq N. \quad (1)$$

В сформированной системе число уравнений ($4N^2$) существенно превышает число неизвестных ($2N(N+1)$), при этом правые части уравнений содержат погрешности [7]. Исключив из системы (1) все значения $[I_{ij}]$, получаем также переопределенную систему уравнений $2N(N-1)$ для определения N^2 неизвестных h -коэффициентов. Следовательно, систему необходимо дополнить одним из условий нормировки, $h_{ij} = 0$ например: для фиксированного (i, j) -го ФПЭ.

Таким образом, решение системы (1) относительно коэффициентов $[h_{ij}]$ позволяет скомпенсировать случайную составляющую сигнала (шум), которая описывает геометрический тепловой шум, вызванный флуктуациями температуры приемника и шум схемы оптического считывания.

Выводы

1. В работе проанализированы проблемы искажений в ИК-изображениях. Рассмотрена проблема зашумления полезного сигнала при работе матричными фотоприемными устройствами (МФПУ).
2. Описан подход к подавлению аппаратных шумов. Основными видами шума рассматриваемого ФПУ являются тепловой шум, вызванный флуктуациями температуры приемника и шум схемы оптического считывания. Для избавления от этих недостатков в микроболометрических ФПУ предложено использовать термооптический эффект в полупроводниках.

3. Реализован программно-аппаратный метод для подавления геометрических шумов, который состоит во введении двумерного малоамплитудного сканирования со специально подобранным законом, по которому матрица ФПЭ смещается относительно изображения при регистрации соответствующей последовательности кадров.

Литература

1. Котовський В. Й. Інфрачервона термографія як сучасний метод первинної діагностики // Біомедична інженерія. – 2011. – № 1. – С. 38 – 43.
2. Котовський В. Й. Термографія як неінвазивний метод первинної діагностики // "Біомедична інженерія і технологія": II міжнародна конференція, 2011: тези доповідей. – К. 2011. – С. 92 – 95.
3. Найда С. А. Обзор неинвазивных методов измерения глубинной температуры тела человека / С. А. Найда, В. В. Бурикина //Международная научно-практическая конференция "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011": Сборник научных трудов. – Одесса, 2011. – С. 101 – 103.
4. Бовина Л. А. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм / Л. А. Бовина, К. О. Болтарь, И. Д.Бурлаков и др. // Оптический журнал. –1996. – № 6. – С. 74 – 77.
5. Сапцин В. М. Численное моделирование и оптимизация модуляционной автокалибровки матричных ИК-преобразователей / В. М.Сапцин, В. Л.Ганжа. – Мн., 1993. – 48 с. – (Препринт / АНК ИТМО АНБ, № 7).
6. Тихонов А. Н. Методы решения некорректно поставленных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. –288 с.

*Надійшла до редакції
18 грудня 2014 року*

© Шлыков В. В., Данилова В. А., 2015