

УДК 629.7.01

© Степнев В.А., Иванов И.А., Комаров Н.В., Синягин А.В., Кондратьев М.М., Точилов Л.С.
Stepnev, V., Ivanov I., Komarov N., Sinyagin A., Kondratiev, M., Tochilov L.

РАЗРАБОТКА И СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ДВОЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

DEVELOPMENT AND BENCH RESEARCH THERMAL IMAGING SYSTEM FOR THE PROBLEMS OF DUAL-USE

Аннотация. В работе показана перспективность использования К-МОП технологий в части тепловизионных приемников двойного назначения. К-МОП матрицы и фотоприемники на их основе сочетают в себе: высокую чувствительность, низкий уровень собственных шумов, высокий динамический диапазон, возможность первичной обработки на одном кристалле, низкую себестоимость.

Annotation. The paper shows a promising use of C-MOS technology of thermal imaging receiver dual purpose. C-MOS matrix and photodetectors based on them combine: high sensitivity, low intrinsic noise, high dynamic range, the ability of primary processing on a single chip, low cost.

Ключевые слова. Тепловизор, тепловизионная система, инфракрасная система, ИК-спектр, двойное применение.

Key words. Teplovizor, thermal imaging system, infrared system, the infrared spectrum, dual-use.

Важной функцией беспилотных летательных аппаратов (БЛА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в многоуровневой авиационно-космической системе (МАКС) является проведение зондирования в диапазонах волн, для которых затруднительно наблюдение из космоса (длинноволновая радиолокация, некоторые диапазоны инфракрасного (ИК) спектра и т.п.) [1].

Для дистанционного зондирования в диапазоне ИК-спектра в состав целевой аппаратуры БЛА должна входить система тепловизионного наблюдения "смотрящего" типа [2], позволяющая распознавать контрастные тепловизионные изображения (рис.1).

Учитывая значительные затраты на разработку и стендовые исследования ИК-системы для БЛА, включающей алгоритмы распознавания, был проведен анализ окупаемости инвестиций. Для окупаемости инвести-



Рис. 1. Тепловизионное изображение батареи отопления, руки и цветка на фоне окна

ций важнейшими задачами являются расширение области применения ИК-системы и обеспечение её качества.

Важным показателем качества системы является использование при разработке системы передовых тех-

Степнев Владимир Александрович – инженер 1 категории, РС «VPK «NPO mashinostroeniya», тел.(495) 528-57-13;

Иванов Илья Александрович – научный сотрудник ОАО «ВПК «НПО машиностроения»;

Комаров Николай Валерьевич – кандидат технических наук, генеральный директор–главный конструктор ЗАО «Мультиспектр»;

Синягин Антон Владимирович – инженер 2 категории, ОАО «ВПК «НПО машиностроения»;

Кондратьев Михаил Михайлович – инженер 2 категории, ОАО «ВПК «НПО машиностроения»;

Точилов Леонид Сергеевич – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь НТС ОАО «ВПК «НПО машиностроения».

Stepnev, Vladimir – engineer 1 categories of PC "MIC "SPA machine building", tel. (495) 528-57-13;

Ivanov, Ilya – researcher of of PC "MIC "SPA machine building";

Komarov Nikolay – Ph.D., general director-chief designer of CJSC "Multispektr";

Sinyagin Anton – engineer 2 categories of PC "MIC "SPA machine building";

Kondratiev, Mikhail – engineer 2 categories of PC "MIC "SPA machine building";

Tochilov Leonid – Ph.D. in physics and mathematical sciences, scientific secretary STC of PC "MIC "SPA machine building".

нических решений. В современной практике разработки охлаждаемых матричных тепловизионных приемников применяются следующие полупроводниковые материалы: твердые растворы теллуридов кадмия и ртути (КРТ); антимонид индия (InSb); химические соединения благородных металлов платиновой группы с кремнием (в первую очередь силицида платины – PtSi).

Несмотря на то, что охлаждаемые матрицы на основе КРТ и InSb до сих пор являются лидерами по реализации на их основе тепловизионной техники, К-МОП матрицы на основе PtSi имеют ряд преимуществ. PtSi является перспективным материалом для создания ответственных многоэлементных ИК-фотоприемников. Низкая квантовая эффективность компенсируется их способностью работать в режиме накопления и крайне низким уровнем шумов. Многоэлементные фотоприемники на основе PtSi способны работать в режиме ограничения флуктуациями фона. В указанном режиме детектирующие свойства фотоприемников определяются шумами фонового излучения. Кроме того, в отличие от альтернативных фотоприемников PtSi технологически полностью совместим с кремнием. Важным преимуществом многоэлементных фотоприемников (К-МОП – матриц) является возможность размещения различных схем электронного обрамления матрицы на одном кристалле с фотоприемником, возможность их работы при высоких кадровых частотах и возможность регулировки времени экспозиции. Также неоспоримым преимуществом К-МОП технологии является ее отработанность на ответственных полупроводниковых заводах, а также достаточно большой выход годных изделий.

Целью работы являлось создание стенда отработки тепловизионного матричного фотоприемного устройства (МФПУ). Основным элементом МФПУ является охлаждаемая К-МОП матрица разрешением 320x240 элементов, обладающая чувствительностью в диапазоне 3–5 мкм. Также в состав МФПУ входят: криостат, оптическая система, а также электронный блок управления и обработки.

При отработке системы использовались абсолютно черное тело М310, а также реальные объекты. На первом этапе был создан стенд для отработки временных диаграмм управления матричным фотоприемником. Диаграммы управления формировались при помощи программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) серии Cyclone. Аналоговый сигнал с матрицы преобразовывался при помощи высокоскоростного 14-разрядного АЦП. Для согласования выходного сигнала с входом АЦП были введены аналоговые схемы смещения и масштаби-

рования. Также в составе стенда предусмотрены регулируемые источники питания аналоговой и цифровой части матрицы. Ввод информации в компьютер осуществлялся в покадровом режиме через низкоскоростной LPT порт. При помощи данного стенда была проведена “холодная” отбраковка необходимого числа матриц для последующей установки в технологический криостат.

Работа со стендом на первом этапе выявила ряд проблем, усложнивших получение качественного тепловизионного изображения в реальном времени. Для улучшения качества получаемой информации был создан следующий вариант стенда. В нем был применен специализированный АЦП, работающий в режиме двойной коррелированной выборки (ДКВ). Этот вид АЦП не требует внешних аналоговых схем согласования и позволяет эффективно бороться с низкочастотными шумами.

Также в состав нового стенда входит цифровой сигнальный процессор [3] серии С6000 фирмы TI. Ввод информации в компьютер осуществляется по интерфейсу Ethernet 10/100 Мбит по протоколу UDP.

Получаемая с матрицы информация подвергается предварительной обработке с целью компенсации основных искажающих факторов, присущих процессу формирования изображения МФПУ. К таким факторам относятся: собственный шум элементов матрицы, нелинейность чувствительности элементов матрицы, температурный фон (снижающий контрастность изображения). Кроме того, матрица, как правило, содержит дефектные элементы, значения которых следует заменить аппроксимацией по значениям соседних элементов.

Собственный шум и нелинейность чувствительности элементов являются строго консервативными параметрами, присущими данной конкретной матрице. Поэтому, проведя измерение этих параметров в контролируемых условиях (калибровка матрицы), их можно использовать в дальнейшем для компенсации искажений на получаемых с данной матрицы изображениях. Собственный шум элементов матрицы соответствует изображению, полученному с нее при нулевом входном сигнале (без засветки). Компенсация собственного шума сводится к вычитанию из получаемого изображения снимка без засветки. Для компенсации нелинейности чувствительности элементов матрицы делается серия снимков с различными уровнями однородной засветки матрицы, по которым выполняется аппроксимация характеристики чувствительности для каждого элемента матрицы. Получаемые далее с матрицы снимки корректируются в соответствии с полученными характеристиками чувствительности элементов.

Поскольку имеющийся стенд не позволяет получать снимки с различными уровнями однородной засветки, в работе пришлось ограничиться лишь устранением собственного шума матрицы.

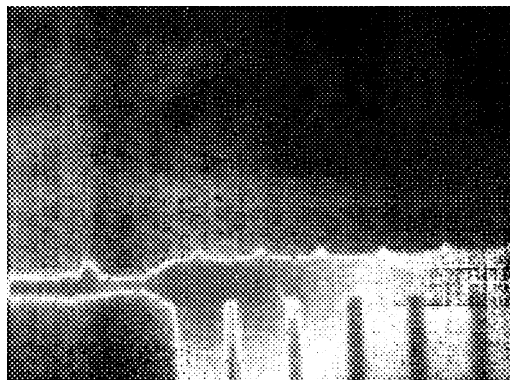


Рис. 2. Тепловизионное изображение батареи отопления

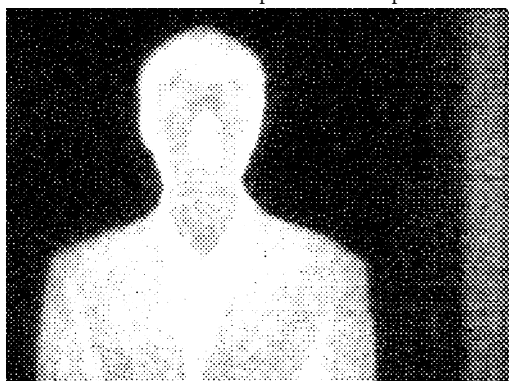


Рис. 3. Тепловизионное изображение человека

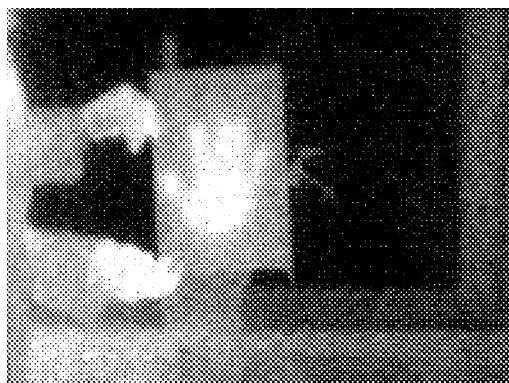


Рис. 4. Тепловизионное изображение теплового следа руки

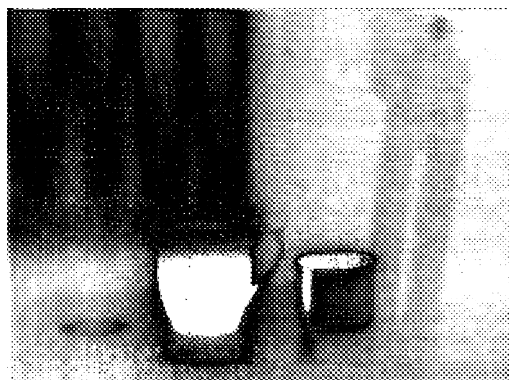


Рис. 5. Тепловизионное изображение кружки

Представленные на рис. 1–5 тепловые изображения были получены при кадровой частоте 40 Гц. Из алгоритмов обработки были применены только вычитание фона и сдвиг цветовой шкалы для улучшения контрастности изображения.

Также был проведен анализ и моделирование различных методов фильтрации тепловизионных изображений. Наиболее оптимальным в данном случае является применение метода адаптивной медианной фильтрации. Для этого метода медиана вычисляется как средний отсчет в упорядоченном множестве значений, выбираемых при помощи скользящего окна. Размер окна динамически зависит от яркости соседних пикселей. Для его вычисления вводится пороговый коэффициент отклонения яркости $S_{ib} = [0, 1]$. Величины отклонения яркости соседних пикселей $A(r, n, m)$, попавших в окно размером $n \times m$, относительно яркости центрального отсчета $A(r)$ запишутся в виде

$$S_{nm}(r) = \left| \frac{A(r, n, m) - A(r)}{A(r)} \right|.$$

Тогда критерий, согласно которому необходимо увеличивать размер маски с центральным отсчетом r , будет иметь вид

$$\max[S_{nm}(r)] < S_{th}.$$

С целью дальнейшего улучшения характеристик тепловизионной системы была разработана структурная схема блока управления и обработки изображений (рис. 6).

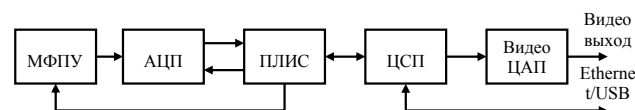


Рис. 6. Структурная схема блока управления и обработки изображений

В данной структурной схеме ПЛИС отвечает за управление МФПУ, ввод данных из АЦП, а также за некоторые первичные алгоритмы обработки, требующие большого количества однотипных операций. Этими алгоритмами являются: вычитание фона, коррекция неоднородности, а также удаление дефектных элементов. Цифровой сигнальный процессор (ЦСП) отвечает за управление работой всего блока обработки, а также за алгоритмы фильтрации изображений, регулировки яркости и контрастности и представление изображений в псевдоцветах.

Таким образом, реализовав описанные аппаратные и программные средства, а также доработав оптическую систему, получим конкурентноспособный вариант матричного тепловизора. Он может быть реализован полностью на отечественной элементной базе.

На основе полученной экспериментальной обработки матричных фотоприемников можно сделать вывод о возможных сферах применения данной технологии не только в специальной технике, но и в народном хозяйстве.

Высокая чувствительность данного типа матриц позволяет применять их при диагностике тепловых потерь в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Для просмотра теплотрасс тепловизоры устанавливаются на летательном аппарате на специальной платформе и исследуют район с воздуха. Сканированное изображение запоминается и затем анализируется. В процессе реализации научно-исследовательской работы «Определение научно и технически обоснованного облика, состава и характеристик эффективной системы дистанционного зондирования Земли, объединяющей и использующей преимущества космических и беспилотных летательных аппаратов» было определено использование данного тепловизора на борту беспилотного летательного аппарата.

Высокая информативность тепловидения при обнаружении скрытых дефектов зданий и сооружений привела к широкому распространению тепловизионного метода. Метод тепловизионного обследования позволяет выявить термически неоднородные участки зданий для выявления характера и общей картины теплопотерь.

Высокая разрешающая способность в сочетании

с чувствительностью обуславливает применения в медицинской технике для обследования пациентов с целью раннего профилактического диагностирования целого ряда заболеваний до появления жалоб больного и деструктивных изменений в тканях.

В промышленности при помощи тепловизора возможно обнаружение дефектов во всех видах металлопроката при высоких скоростях перемещения проката и высоких температурах, а также диагностика напряженного состояния материалов на основе термоэластического эффекта.

Выводы. В статье показана перспективность использования К-МОП технологий в части тепловизионных приемников двойного назначения. К-МОП матрицы и фотоприемники на их основе сочетают в себе:

- высокую чувствительность;
- низкий уровень собственных шумов;
- высокий динамический диапазон;
- возможность первичной обработки на одном кристалле;
- низкую себестоимость.

Перечисленные свойства К-МОП фотоприемников делают их перспективными не только для задач ДЗЗ с помощью БЛА, но и для задач двойного применения: строительство, ремонт, диагностика в медицине и на производстве.

Литература

1. Точиллов Л.С., Натаров Б.Н., Горский В.В., Копылов А.Ю., Заиграев В.В., Степнев В.А., Синягин А.В., Шатовалов Л.А., Фетисов А.В. Определение научно и технически обоснованного облика, состава и характеристик эффективной системы дистанционного зондирования Земли, объединяющей и использующей преимущества космических и беспилотных летательных аппаратов // Научно-технический отчет о выполнении 2 этапа Государственного контракта № П608 от 06 августа 2009 г. Реутов, ОАО «ВПК «НПО машиностроения», инв.№127/12-4, 2010. – 438 с.
2. Тарасов В.В., Якушкин Ю.Г. Инфракрасные системы "смотрящего" типа, М: Логос, 2004 – 444с.
3. Груздев М.В. Цифровой сигнальный процессор тепловизионного канала на базе процессора Л1879ВМ1 (NM6403) // Компоненты и технологии. 2000. № 8.

Материал поступил в редакцию 22. 03. 2011 г.