

УДК 621.384.326.2:621.397.13:546.48'49'24

ТЕПЛОВИЗОР НА ОСНОВЕ “СМОТЯЩЕЙ” МАТРИЦЫ ИЗ $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ ФОРМАТА 128X128

К. О. Болтарь, Л. А. Бовина, Л. Д. Сагинов, В. И. Стафеев

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение “Орион”»,
Москва, Россия

И. С. Губин, В. М. Малеев

СНИИОС, Новосибирск, Россия

Изготовлен и исследован макет бесканерного тепловизора формата 128x128 на спектральный диапазон 8—12 мкм. Тепловизор состоит из матрицы фоточувствительных элементов на основе фотодиодов из КРТ, состыкованной на индиевых столбиках с охлаждаемым МОП-мультиплексором, микрокриогенной системы Сплит-Стирлинга и электронного блока обработки изображения. Эквивалентная шуму разница температур тепловизора не превышает 0,1 К.

Применение в тепловизионных системах матричных фотоприемников (МФП) ИК-диапазона “смотрящего” типа дает одно неоспоримое преимущество: отсутствие громоздкого механического устройства — сканера. Это позволяет существенно уменьшить габаритные размеры, энергопотребление, упрощает требования к оптической схеме тепловизионной системы.

Нами изготовлен и исследован макет бесканерного тепловизора на основе матричного фотоприемника формата 128x128 на спектральный диапазон 8—12 мкм. Состав тепловизора:

МФП;

микрокриогенная система Сплит-Стирлинга;

электронный блок обработки данных;

ИК-объектив с фокусным расстоянием 70 мм и относительным отверстием 1:1,5;

дисплей;

корпус;

МФП состоит из матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе фотодиодов из КРТ, состыкованной на индиевых столбиках с охлажденным МОП-мультиплексором с построчным накоплением фотосигнала, размещенные в криостатируемом корпусе типа “Арча”. Шаг МФП 40 мкм, среднее по МФЧЭ значение удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной характеристики $4,5 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ см}^2 \text{ Гц}^{-1/2}$.

Микрокриогенная система типа Сплит-Стирлинга, изготовленная в НТК Криогенная техника (г. Омск), обеспечивает охлаждение МФП до температуры 80 К и стабилизацию температуры с точностью не хуже 0,1 К. Стабилизация температуры осуществляется контроллером температуры по термодатчику, установленному в холодной зоне МФП. Напряжение питания МКС 27 В постоянно, стационарное энергопотребление 40 Вт.

Электронный блок обработки включает модуль управления МФП и модуль обработки сигналов, выполняющий двухточечную коррекцию неравномерности чувствительности и осуществляющий алгоритм устранения из изображения дефектных элементов. На выходе блока формируется стандартный телевизионный сигнал с частотой кадров 25 Гц. Электронный блок обработки обеспечивает выполнение следующих функций.

1. Управление работой ФПУ, т. е. формирование и передачу в “холодную” зону напряжений питания и тактовых управляющих импульсов для синхронной работы регистров и секций накопления кремниевой интегральной схемы считывания и создания оптимального режима работы КРТ-фотодиодной матрицы. Алгоритм функционирования охлаждаемой электроники считывания разработан в НИР “Окружность”.

2. Прием и усиление фотосигналов (два канала) до масштаба, необходимо для последующего аналого-цифрового преобразования.

3. Аналого-цифровое преобразование массива (16384 значения на один кадр) данных.

4. Корректирование неоднородности чувствительности (выравнивание геометрического шума) — одна из основных функций ФСИ для матричных фотоприемников смотрящего типа.

Причиной возникновения геометрического шума может быть разброс характеристик фоточувствительных элементов, ключевых транзисторов в мультиплексоре, каналов накопления фотосигнала и др. Однако вне зависимости от природы такой неоднородности напряжение на выходе секции накопления $F_{ij}(T)$, соответствующее i, j -му элементу, можно представить в виде

$$F_{ij}(T) = S_{ij}\Phi_T + V_{ij}, \quad (1)$$

где S_{ij} — эффективная вольт-ваттная чувствительность элемента;

Φ_T — поток ИК-излучения при температуре сцены T ;

V_{ij} — эффективное темновое напряжение элемента.

В идеальном случае при однородной засветке Φ_T все 16384 значения $F_{ij}(T)$ равны. Однако в действительности в значениях $F_{ij}(T)$ наблюдается разброс, среднеквадратичное значение которого, как правило, составляет несколько десятков процентов. Указанная неоднородность описывается, как можно видеть из (1), различием в аддитивной V_{ij} и мультиплекативной S_{ij} составляющих.

Теория линейных преобразований дает корректный рецепт пересчета неоднородного поля $F_{ij}(T)$ в однородное ($O_{ij}(T)$) без потери информационной емкости исходного поля. Для этого необходимо измерить массивы значений $F_{ij}(T)$ при двух температурах T_1 и T_2 и затем пересчитать значения фотосигналов $F_{ij}(T)$ при произвольной температуре T по следующей формуле:

$$O_{ij} = \left[F_{ij}(T) - F_{ij}(T_1) \right] \frac{\overline{F(T_2)} - \overline{F(T_1)}}{F_{ij}(T_2) - F_{ij}(T_1)} + F(T_1), \quad (2)$$

где $\overline{F(T_1)} = \sum F_{ij}(T_1)/16384$, $\overline{F(T_2)} = \sum F_{ij}(T_2)/16384$ — средние значения фотответа по массиву.

Из (2) видно, что коррекция значений проводится в два этапа. На первом из измеренных значений $F_{ij}(T)$ вычитается аддитивная составляющая (темновые токи) $A_{ij} = F_{ij}(T_1)$, на втором — нормируется вольт-ваттная чувствительность путем умножения на мультипликативный коэффициент

$$M_{ij} = \frac{\overline{F(T_2)} - \overline{F(T_1)}}{F_{ij}(T_2) - F_{ij}(T_1)}.$$

Экспериментальные исследования влияния геометрического шума и методов его устранения на качество изображения на макете ФПУ формата 128x128 показали, что формула (2) должна быть несколько усложнена:

а — для мультипликативных коэффициентов целесообразно ввести ограничение сверху; $M_{ij} = M_{\max}$, если $M_{ij} > M_{\max}$. Дело в том, что элементы с уменьшенной токовой чувствительностью в отсутствие указанного ограничения M_{ij} из-за увеличенных в M_{ij} раз шумов на тепловом изображении имеют вид мерцающих ярких точек, что при визуальном наблюдении смотрится гораздо хуже, чем слегка затемненные точки в случае введения указанного ограничения. Определенное на данном этапе предварительное значение $M_{\max} = 3$ должно уточняться на готовом макете ФСИ, но возможность введения этого ограничения должна быть учтена при конструировании модуля выравнивания геометрического шума;

б — контрастность более теплых чем фон предметов увеличивается, если в формуле (2) вычесть общее для всех элементов значение, примерно равное средней величине шума. Такая возможность также должна быть учтена при конструировании модуля. Примеры изображения темновых полей каждого элемента V_{ij} , вольт-ваттной чувствительности каждого элемента S_{ij} представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

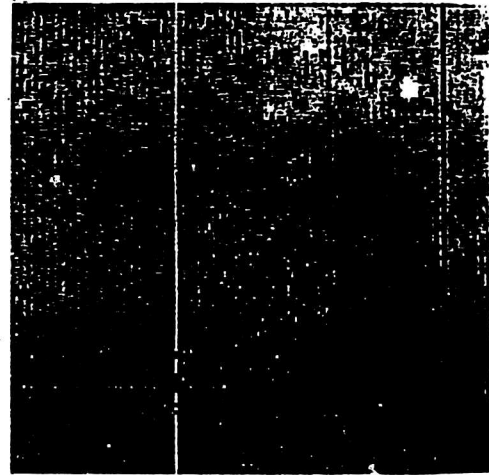
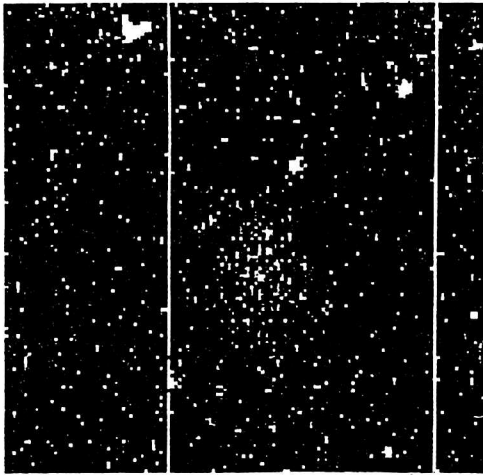


Рис. 1. Изображение темновых полей МФП

Рис. 2. Чувствительность элементов МФП

Большим величинам темновых токов на рис. 1 и большим коэффициентам чувствительности на рис. 2 соответствуют светлые тона. Коррекция фонового тока и чувствительности элементов осуществляется после выхода на рабочий режим путем нажатия кнопок КОРР1 и КОРР2 на панели электронного блока обработки. При изменении температуры окружающей среды или тепловизора коррекцию необходимо повторить.

5. В матричном фотоприемнике, как правило, присутствует некоторое число неработающих элементов. Обычно их число составляет 1—5%. На рис. 3, а представлен пример телевизионного изображения с дефектами. Темные линии обусловлены обрывами шин и утечками МОП-транзисторов кремниевого МОП-мультиплексора МФП. Точечные темные дефекты обусловлены дефектами стыковки матрицы фотодиодов из КРТ с кремниевым МОП-мультиплексором индиевыми столбиками и дефектными фотодиодами из КРТ. Для исключения влияния таких ФЧЭ на изображение применяют стандартный прием—замену сигнала дефектно-

го ФЧЭ на сигнал одного из соседних ФЧЭ, т. е. проводится корректировка изображений.

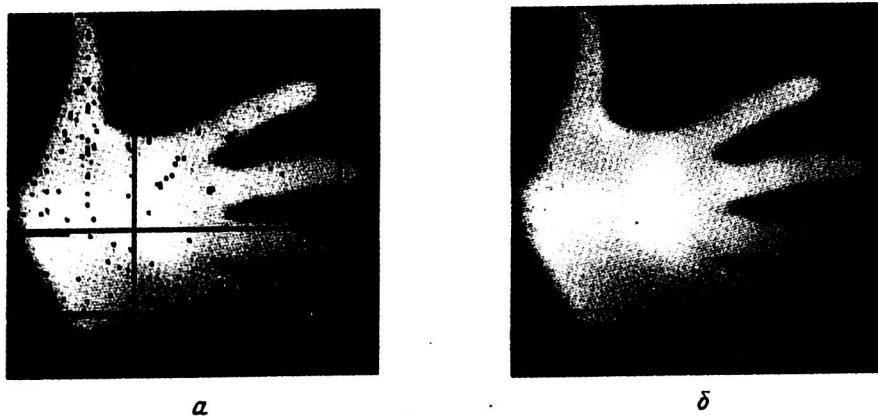


Рис. 3. Изображение: без коррекции дефектов (а), с коррекцией дефектов (б)

Замена осуществляется в электронном блоке обработки в каждом кадре изображения в соответствии с таблицей замены дефектных элементов, которая записывается в ПЗУ электронного блока обработки на этапе наладки работы блока с конкретным экземпляром МФП. Опыт работы с несколькими тепловизорами показал, что в ходе эксплуатации при неизменных режимах работы МФП и микрокриогенной системы положение дефектных элементов не изменяется. На рис. 3, б представлено то же изображение, что и на рис. 3, а, но после загрузки в ПЗУ электронного блока обработки таблицы замены дефектных элементов.

6. Формирование стандартного телевизионного сигнала (стандарт RS-343A, ГОСТ 7845-92) для вывода на внешнее видеоконтрольное устройство.

7. Электронный блок обработки содержит модуль обмена программами и данными с ЭВМ типа IBM PC по каналу RS-232. Скорость обмена 19,2 Кбит/с.

Для определения характеристик МФП в составе тепловизора производились стендовые измерения разницы температур ΔT , эквивалентной шуму на нулевой пространственной частоте, по формуле

$$T_m = \frac{N(T_2 - T_1)}{S},$$

где N — среднее по МФП напряжение шума;

S — средний сигнал по всем элементам МФП при разности температур объективов $T_2 - T_1$.

Измерения величин N и S проводились на стенде измерения параметров МФП. При измерениях температуры объективов имели: $T_1 = 302$ К, $T_2 = T_1 + 5$ К; фокусное расстояние объектива — 30 мм; относительное отверстие 1:1,5; кадровая частота 50 Гц.

Измеренные значения разницы температур, эквивалентной шуму в нескольких режимах работы МФП, не превышали 0,1 К. Основной вклад в измеряемое значение величины шума N давали помехи от работы мотора микрокриогенной системы.

На рис. 4, а, б представлены примеры тепловизионных изображений. На тепловизионном изображении (см. рис. 4, б) металлической передней панели элект-

трораспределительного щитка, расположенного на расстоянии 10 м, отчетливо видны участки с повышенным тепловыделением в центре и на самом краю слева (место крепления провода заземления электrorаспределительного щитка).

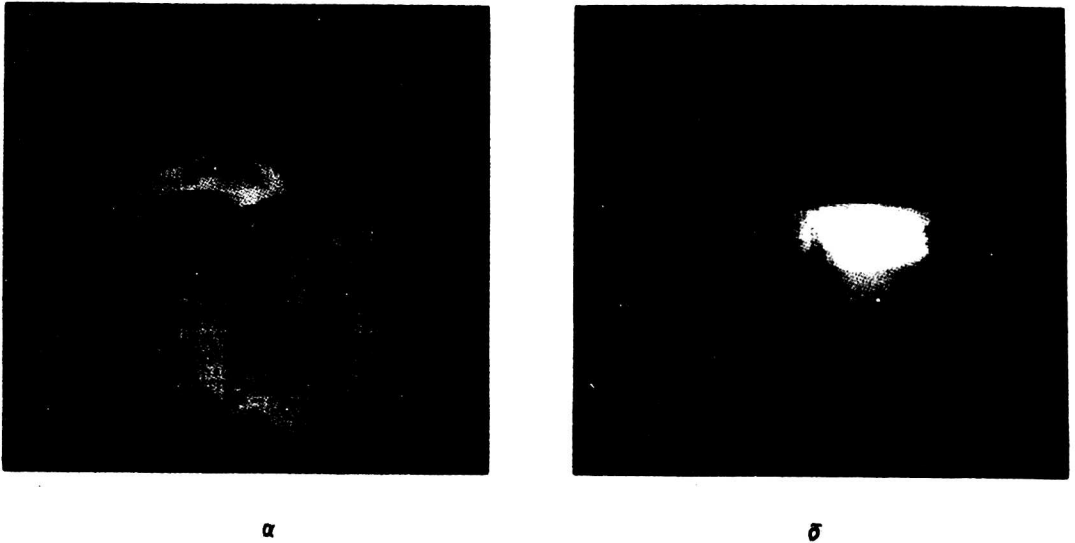


Рис. 4. Примеры ИК-изображений (а, б)

Разработанный нами тепловизионный прибор позволяет в реальном масштабе времени получать картину температурного контраста с высокой четкостью изображения в инфракрасном диапазоне длин волн.

Прибор предназначен для поиска и идентификации потерь (утечек) тепла и анализа выхода из строя в тепловых машинах и сетях, жилых и производственных помещениях с целью энергосбережения, а также для контроля электросетей для предотвращения аварийных ситуаций. В более широком плане предлагаемый прибор может эффективно применяться везде, где температурный контраст дает дополнительную информацию об объекте.

IR IMAGER BASED ON 128x128 STARING FOCAL PLANE ARRAY

K. O. Boltar, L. A. Bovina, L. D. Saginov, V. I. Stafeev
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

I. S. Gibin, V. M. Maleev
Siberian Institute of Optical Systems, Novosibirsk, Russia

Staring LWIR camera have been developed and investigated. Camera consist of Cadmium Mercury Telluride (CMT) 128x128 Focal Plane Array (FPA) bonded by Indium bumps with silicon MOS-multiplexer, Split-Stirling cooler, electronic signal processor. Noise equivalent temperature difference NETD is less then 0,1 K.