

УДК 681.2.084

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЦЕНЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: nejevenko@iae.nsk.su*

Рассмотрен экспериментальный макет имитационно-моделирующего стенда для формирования и ввода в оптико-электронный тракт инфракрасной системы изображений, сгенерированных в компьютере. Проведены эксперименты по синтезу изображений мир в диапазоне 3–5 мкм, а также динамических сцен. Даны экспериментальные оценки макета.

*Ключевые слова:* DPL-технологии, микрозеркальные системы, инфракрасные системы, спектральный диапазон, тепловизионное изображение.

**Введение.** Одна из важных задач при разработке инфракрасных систем наблюдения, пеленгации изображений и сигналов — проведение исследований таких систем с применением имитационно-моделирующих стендов. Ключевыми элементами этих стендов являются генераторы тепловизионных изображений, обеспечивающие формирование как тестовых статических, так и близких к реальным динамических сцен.

В [1] проведён анализ систем генерации динамических сцен для тестирования тепловизионных приборов. В качестве преобразователя изображений используется микрозеркальный модулятор на основе DLP-технологий (Digital Light Processing).

Современные зарубежные системы генерации динамической ИК-сцены способны формировать изображение с разрешением до  $1024 \times 1024$  пикселя, температурой до 700 К и частотой кадров 50–400 Гц. Выходное тепловизионное изображение создаётся на основе входного цифрового сигнала с разрешением до 16 бит [2]. В настоящее время в России аналогичных систем не существует, что является сдерживающим фактором для развития тепловизионной и теплопеленгационной отраслей приборостроения.

В данной работе предлагаются макет экспериментального имитационно-моделирующего стенда, созданный на основе DLP-технологий, и результаты его исследований.

**Эксперимент и его результаты.** Схема комплекса, предназначенного для генерирования тепловизионных изображений в области длин волн 3–5 мкм, представлена на рис. 1. Источник инфракрасного освещения 2, имеющий форму цилиндра из металла, нагретого до заданной температуры (аналог абсолютно чёрного тела (АЧТ)), со своим блоком управления 1, излучает световой поток и направляет его с помощью конденсорной оптической системы, состоящей из зеркального лабиринта 3, линзы 4, плоского зеркала 5 и параболического зеркала 6, на оптический модулятор 7, формирующий заданное динамическое изображение с помощью массива микрозеркал. Наклон каждого микрозеркала электростатически управляется через интерфейс 8 ЭВМ, которая производит расчёт имитационного инфракрасного видеоизображения. Уровни рассчитанного полутонового изображения получают в модуляторе за счёт широтно-импульсной модуляции микрозеркала. Освещение массива микрозеркал внеосевое, каждое микрозеркало направляет (или уводит) свет на

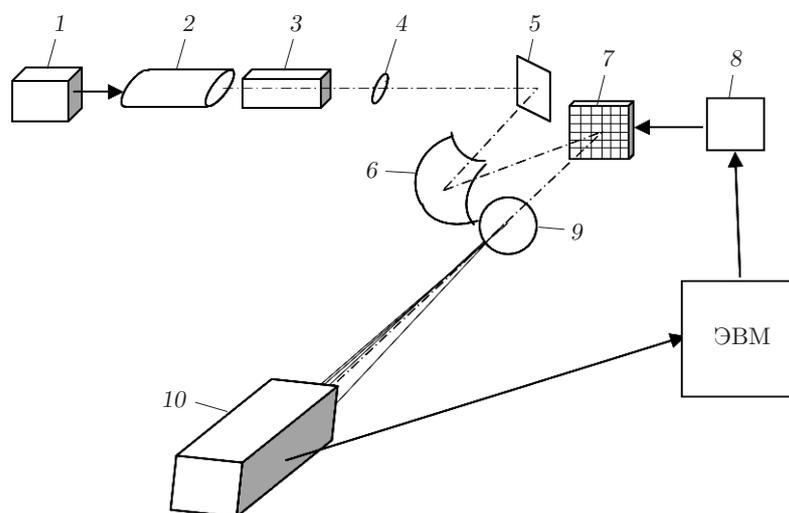


Рис. 1. Схема проектора для генерации ИК-изображений

зрочок проекционной оптической системы. Микрозеркало направляет свет в зрочок в течение кадра, длительность которого пропорциональна значению пикселя имитационного видеоизображения. Разрешение, амплитуда и частота кадров в таком устройстве ограничены и обратно пропорциональны времени цикла модуляции каждого пикселя. Инфракрасное изображение, формируемое модулятором, через оптическую систему 9 и встроенный объектив ФПУ проецируется в плоскость фотоприёмной матрицы тепловизионного устройства 10 и вводится в ЭВМ.

Специфика блока освещения модулятора объясняется тем, что моделирующий комплекс создан на основе видеопроектора BENQ MX501, в котором вся оптика видимого диапазона заменена оптикой ИК-диапазона (3–5 мкм), а освещающая лампа — аналогом АЧТ, излучающим в соответствующей области. Комплекс обеспечивает разрешение  $1024 \times 768$  пикселей при разрядности 8 на частоте 50 Гц. Температура АЧТ 600 К. Для считывания сгенерированного изображения в работе использовался тепловизор производства Новосибирского филиала ИФП СО РАН «КТИ прикладной микроэлектроники» на базе приёмника "Epsilon MW K562S" (фирма "Sofradir"). Приёмник представляет собой матрицу на основе

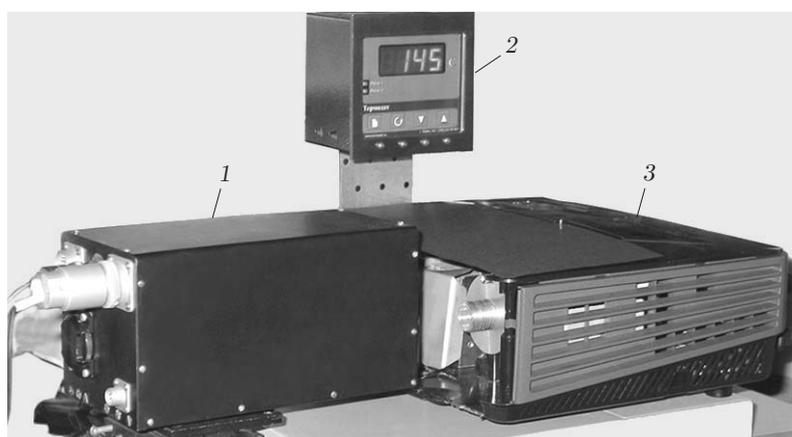


Рис. 2. Внешний вид макета для генерации ИК-изображений

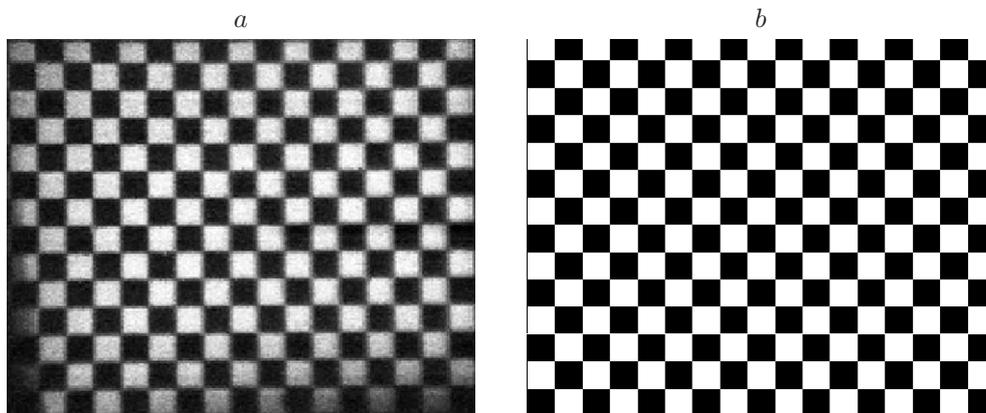


Рис. 3. Бинарное изображение: записанное с помощью макета (а) и исходное (b)

твёрдых растворов кадмий—ртуть—теллур, рабочий спектральный диапазон 3,4–4,8 мкм, размер матрицы 288 × 384 элемента.

Внешний вид макета представлен на рис. 2 (1 — тепловизор, 2 — блок управления источником ИК-излучения, 3 — видеопроектор). В качестве блока управления, задающего температуру источника ИК-излучения, использован прибор «Термодат-10К5». Цифры на экране обозначают температуру излучающего цилиндра. Изображения, записанные с помощью этого прибора, и исходные изображения показаны на рис. 3, 4.

Видно, что считанное тепловизором изображение неравномерно освещено и зашумлено. Неравномерность освещения обусловлена недостаточной однородностью прогрева источника ИК-излучения и неидеальностью конденсорной системы, что в значительной степени можно компенсировать надлежащей калибровкой тепловизора. Шум в значительной степени определяется нагревом DMD-модулятора (Digital Micromirror Device), в частности его покровного стекла. Предполагается в дальнейшем установить модулятор на холодильник Пельтье, что существенно снизит его температуру и соответственно уменьшит шум генерируемого изображения.

Моделирующий комплекс испытывался также в режиме генерации динамических инфракрасных сцен, т. е. на модулятор с ЭВМ подавался AVI-файл. Генерация тепловизионного изображения производилась с частотой 50 кадр./с. Кадр AVI-фильма с изображением летящего вертолёта представлен на рис. 5.

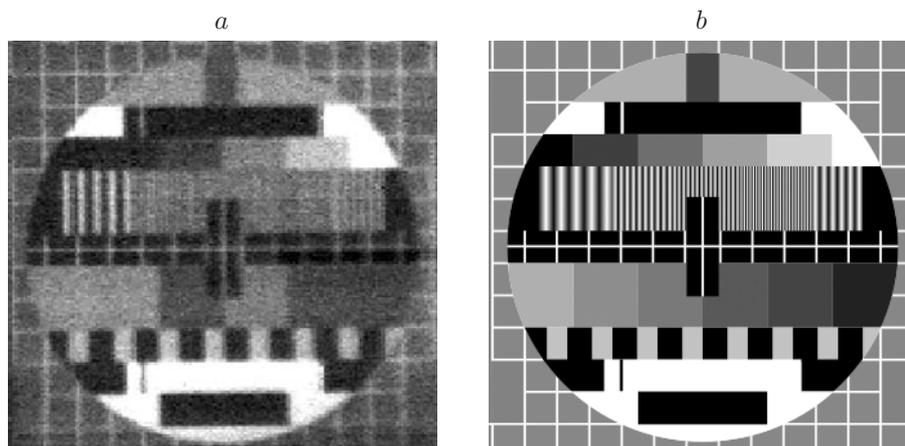


Рис. 4. Полутоновое изображение: записанное с помощью макета (а) и исходное (b)



Рис. 5. Фрагмент тепловизионного фильма

Важнейшей характеристикой вышеописанного стенда является световая энергетика. В состав стенда входил серийный DMD-модулятор, предназначенный для модуляции световых потоков видимого диапазона. Оказалось, что защитное стекло DMD-модулятора частично прозрачно и для световых потоков с длиной волны 3–4 мкм. Для оценки коэффициента пропускания стекла в этой области проведён следующий эксперимент. Перед DMD-модулятором установлено экранирующее зеркало, угол наклона которого был таким же, как и у микрозеркала, когда оно весь световой поток направляло в объектив. Затем тепловизором считывалось световое поле, формируемое этим зеркалом. Сравнивались значения сигналов, считанных с тепловизора, для полей, сформированных DMD-модулятором и экранирующим зеркалом. Чтобы обеспечить приемлемое значение сигнала от DMD-модулятора, температуру ИК-источника поднимали до  $T_M = 600$  К. При такой температуре сигнал от зеркала превышал максимально допустимый, поэтому приходилось снижать температуру ИК-источника до  $T_3 = 400$  К.

Результаты эксперимента: максимальное значение сигнала тепловизора для зеркала (при  $T_3 = 400$  К)  $I_3 = 1,28 \cdot 10^4$ , а максимальное значение сигнала тепловизора для DMD-модулятора (при  $T_M = 600$  К)  $I_M = 1,74 \cdot 10^2$ . С учётом того, что коэффициенты отражения ИК-излучения от экранирующего зеркала и микрозеркала одинаковы, коэффициент пропускания защитного стекла DMD-модулятора в области чувствительности тепловизора будет иметь вид

$$\delta = \sqrt{\frac{I_M \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(T_M, \lambda) s(\lambda) d\lambda}{I_3 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(T_3, \lambda) s(\lambda) d\lambda}}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны;  $s(\lambda)$  — спектральная чувствительность тепловизора;  $R(T, \lambda)$  — спектральная плотность мощности излучения источника, определяемая для АЧТ кривой Планка

$$R(T, \lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1},$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $k$  — постоянная Больцмана.

График спектрального пропускания охлаждаемого фильтра тепловизора представлен на рис. 6 [3]. Отметим, что  $s(\lambda)$  самой матрицы и спектральное пропускание оптики на форму графика практически не влияют, поэтому график можно рассматривать как спектральную чувствительность.

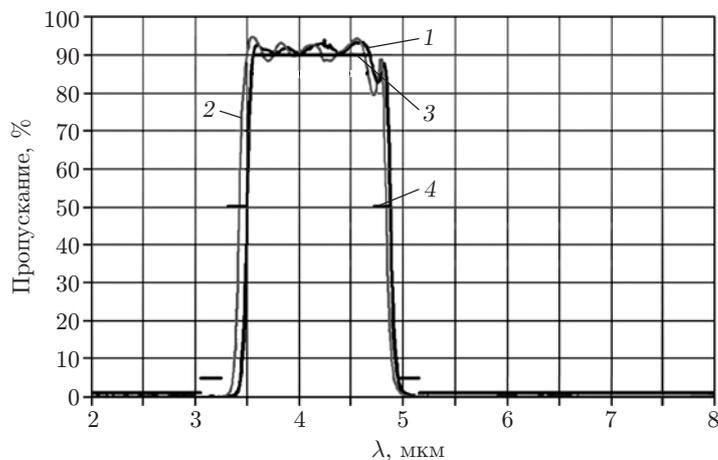


Рис. 6. Спектральное пропускание охлаждаемого фильтра тепловизора (кривая 1 — пропускание окружающей среды, 2 — при температуре 110 К, 3 — среднее, 4 — уровень пропускания 50 %)

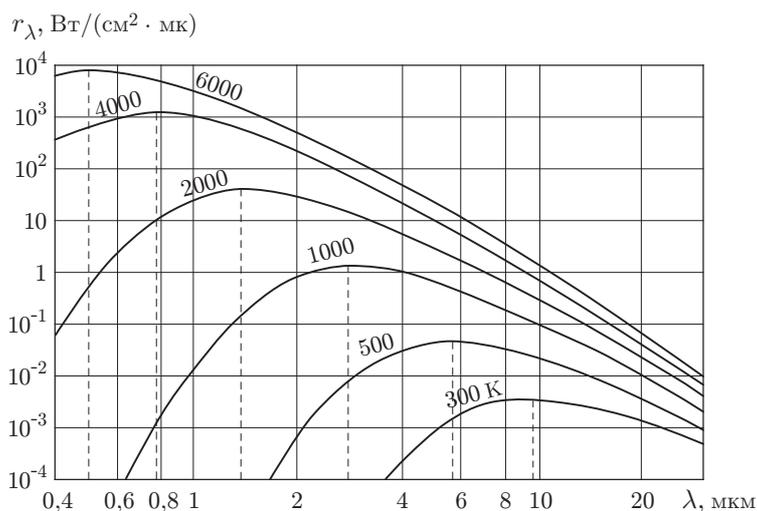


Рис. 7. Кривые Планка для различных температур

Таким образом, из формы графика следует, что  $s(\lambda) = \text{arct}(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$  и отношение интегралов находится как отношение площадей под кривой Планка для температур 400 и 600 К в пределах длин волн от 3,4 до 4,8 мкм. Эти кривые для АЧТ приведены на рис. 7 [4].

Графическое интегрирование даёт отношение интегралов 9,8 и соответственно величину  $\delta = 0,0372$ , т. е. коэффициент пропускания защитного стекла DMD-модулятора в области чувствительности тепловизора порядка 0,04, и для улучшения отношения сигнал/шум стекло необходимо заменить, например, сапфиром.

**Заключение.** Дальнейшее совершенствование комплекса должно идти в направлении расширения его функциональных возможностей. При описанной конфигурации мы можем лишь моделировать излучательную или отражательную способность объекта. Цветовая же температура как фонового излучения, отражаемого объектом, так и собственного излучения объекта одна. Введение нескольких источников теплового излучения с различной температурой и барабанного или секторного зеркального модулятора, попеременно освещающего DMD-модулятор от различных источников, позволит имитировать несколько

цветовых температур и, следовательно, более реально моделировать тепловое излучение объекта и фона.

Что касается использования комплекса синтезирования тепловизионных изображений, то кроме испытания тепловизоров большой интерес может представлять исследование алгоритмов распознавания и слежения за теплоизлучающими объектами с учётом определённой специфики их отображения в ИК-области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гибин И. С., Колесников Г. В., Нежевенко Е. С.** Анализ схем генерации динамической сцены в задачах тестирования тепловизионных приборов // Автометрия. 2011. **47**, № 6. С. 34–38.
2. **Beasley D. B.** Technologies for synthetic environments: Hardware-in-the-loop testing X // Proc. SPIE. 2001. **5785**. P. 68–79.
3. **Epsilon MW K562S F/3** — Technical Data Package // Company "Sofradir". URL: <http://www.sofradir.com/products/pdf/2.pdf> (дата обращения: 12.07.2012).
4. **Фираго В. А.** Методы получения и обработки изображений в медицинских системах. Минск: БГУ, 2007. 91 с.

*Поступила в редакцию 12 июля 2012 г.*

---