

УДК 681.2.084

АНАЛИЗ СХЕМ ГЕНЕРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЦЕНЫ В ЗАДАЧАХ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

И. С. Гибин¹, Г. В. Колесников², Е. С. Нежевенко¹

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: gibin@iae.nsk.su

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

Дан краткий обзор систем тестирования тепловизионных приборов. Представлены распространённые способы получения динамической сцены в инфракрасном диапазоне, используемые в системах тестирования, и их основные параметры. Приведены примерные схемы построения подобных систем, основанные на массивах управляемых микрзеркал и излучающих элементов. Проведён сравнительный анализ наиболее распространённых систем тестирования.

Ключевые слова: генерация динамической сцены в инфракрасном диапазоне, тестирование тепловизионных приборов, измерительные стенды.

Введение. Создание современных систем тепловидения и теплотеленгации является сложной задачей, над решением которой сообща работает множество технических специалистов и целые организации. Хотя готовые изделия проходят выходной контроль по выбранному комплексу параметров, нельзя полностью исключить вероятность ошибок проектирования, а также ошибок практической реализации. Это особенно существенно в случаях, когда демонтаж тепловизионной системы с аппарата-носителя затруднён или полностью невозможен.

Таким образом, вопрос проверки и тестирования специальных тепловизионных систем в условиях, максимально приближённых к реальным, является одним из ключевых при создании приборов данного класса.

В настоящее время уровень технологий даёт возможность не только воссоздавать климатические условия и внешние воздействия, при которых предстоит функционировать тепловизионной системе, но и генерировать инфракрасное имитационное изображение, максимально приближённое к реальному. Такие имитационно-моделирующие стенды активно используются зарубежными разработчиками и позволяют своевременно выявлять ошибки алгоритмов обработки, автоматизированного анализа изображения, а также другие недостатки тепловизионных комплексов (ТПВК).

Постановка задачи. Известные зарубежные системы генерации динамической ИК-сцены способны создавать изображение с разрешением до 1024×1024 пикселя, температурой до 700 К и частотой кадров 50–400 Гц. Выходное изображение в инфракрасном диапазоне формируется на основе входного цифрового сигнала с разрядностью до 16 бит.

Сегодня в России аналогичных систем не существует, что является сдерживающим фактором для развития тепловизионной и теплотеленгационной отрасли приборостроения. Цель предлагаемой работы — проведение анализа задачи генерации динамических ИК-сцен для тестирования тепловизионных приборов.

Устройства генерации ИК-сцены. Существующие технологии создания динамической сцены в ИК-диапазоне могут быть разделены на тепловые и на основе модуляции.

Тепловые технологии используют тонкоплёночные, мостовые и мембранные излучающие сопротивления, а также термоэлектрические устройства, которые генерируют излучение за счёт физической температуры и излучательной способности. Точечные резистивные излучатели малых размеров могут быть организованы в массивы размером более чем 1024×1024 элемента. Величина элемента-источника современных резистивных массивов составляет около 25–40 мкм, а сам массив создаётся на подложке с помощью монолитной графики. Управляя током, проходящим через каждый элементарный излучатель, можно получить требуемую сцену в ИК-диапазоне.

Максимум воспроизводимых температур проекторов сцены в ИК-диапазоне, основанных на тепловой технологии, составляет 700–800 К (в диапазоне 3–5 мкм) и 500–600 К (в диапазоне 8–12 мкм) при разрешении до 20 мК. Важные свойства излучающих резистивных массивов — характерные время переходного процесса (около 5–10 мс) и коэффициент межэлементной связи (1–4 %). В настоящее время тепловые источники излучения наиболее распространены в стендах динамической генерации сцен в ИК-диапазоне. Примерами систем, построенных на основе массива излучающих резистивных элементов, являются приборы MIRAGE ("Santa Barbara Infrared", США) [1, 2].

Другую категорию устройств для генерации сцен в ИК-диапазоне представляют приборы, основанные на модуляции. Излучение источника ИК-освещения в таких системах направляется на модулирующее устройство, которое формирует заданное динамическое изображение, для чего могут использоваться, например, массивы микрозеркал (DMD-технология (Digital Micromirror Device)). Наклон микрозеркала определяется электростатическим потенциалом. Массив микрозеркал освещается внеосевым источником, каждое микрозеркало направляет (или же уводит) свет на зрачок проекционной оптической системы. Уровни чёрно-белого изображения получают с помощью широтно-импульсной модуляции. Разрешение амплитуды и частота кадров в устройствах, основанных на массивах микрозеркал, ограничены и обратно пропорциональны времени цикла модуляции каждого пикселя. Типичные проекторы динамической сцены, созданные с использованием такой модуляции, обеспечивают разрешение 8 бит на частоте 200 Гц, 10 бит на частоте 60 Гц, 11 бит на частоте 30 Гц и т. д. Максимальная видимая температура в устройствах с массивами микрозеркал достигает 800 К (диапазон 3–5 мкм) и 400 К (диапазон 8–12 мкм) с разрешением до 0,1–0,5 К (при частоте кадров 200 Гц).

Отметим, что серийные DLP-проекторы (Digital Light Processing) видимого диапазона (на их основе строятся ИК-проекторы) обычно снабжены секторным модулятором, который позволяет генерировать цветное изображение, а в ИК-диапазоне может обеспечить визуализацию сцены с различной температурой (к примеру, нагретый объект на более холодном фоне). Естественно, для этого необходимо иметь несколько источников (по числу секторов) с различной длиной волны ИК-излучения.

Кроме массивов управляемых микрозеркал для модуляции инфракрасного излучения могут использоваться другие устройства, например модуляторы на жидких кристаллах. На подобном принципе базируется система генерации ИК-сцен INFRADIS.

Сравнительный анализ различных способов построения имитационно-моделирующего комплекса. Комплексы, построенные с применением пропускающих модуляторов на жидких кристаллах или других электрооптических элементов, пригодны, как правило, лишь для имитации тепловых полей в ближней ИК-области.

В случаях, когда требуется моделировать также сцены в дальнем ИК-диапазоне, наиболее перспективными можно считать комплексы на основе тепловых технологий и отражательных модуляторов. Сравнивая их функциональные возможности, проанализируем сцены в ИК-диапазоне, подлежащие моделированию.

Сцены состоят из интересующего нас объекта и фона. Объект характеризуется собственным тепловым излучением и ИК-излучением, отражённым этим объектом. Собственное излучение определяется законом Планка:

$$E(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)c_1\lambda^{-5}(\exp(c_2/\lambda T) - 1)^{-1}, \quad (1)$$

где $E(\lambda, T)$ — зависимость энергии излучения от его длины волны λ и температуры T излучающего тела (спектральная энергетическая светимость); $\varepsilon(\lambda, T)$ — излучательная способность вещества (коэффициент серости); c_1, c_2 — постоянные Планка.

Большинство реальных излучающих тел можно считать «серыми», когда их излучательная способность меньше единицы. Температура тела определяет спектральный состав излучения и его энергию в каждом спектральном диапазоне с учётом излучательной способности тела. К тому же поток теплового излучения зависит от угла наклона нормали к излучающей поверхности и направления от неё на прибор наблюдения (тестируемый тепловизор). Таким образом, при моделировании излучающего тела необходимо задавать как спектральный состав излучения его поверхностей, так и их яркость [3, 4].

Моделирующие устройства на основе тепловых технологий в этом случае мало эффективны, так как излучение нагретых тел зависит от температуры и их излучательной способности. Устройства на основе отражательных технологий более универсальны: они позволяют задать любое распределение яркости, а также ограниченное количество температурных значений (по числу секций модулятора). Оптимальный вариант построения комплекса — комбинация двух методов, где тепловое распределение определялось бы тепловым модулятором, а излучательная способность и изменение излучения из-за наклона плоскостей задавались отражательным модулятором. Однако такой прибор весьма сложен с технической точки зрения, так как тепловое изображение необходимо проецировать на модулятор, потом на тепловизор, что с учётом длины волны не просто.

Что касается отражённого теплового излучения, то следует иметь в виду, что максимум солнечного излучения, определяющий отражённую составляющую, соответствует длинам волн короче 0,75 мкм, а 98 % всей энергии излучения Солнца приходится на участок спектра до 3 мкм. Часто эту длину волны считают граничной, разделяющей отражённую (солнечную) и собственную составляющие ИК-излучения объектов. Следовательно, можно принять, что в ближней части ИК-спектра (до 3 мкм) главной является отражённая составляющая и распределение яркости зависит от распределения коэффициентов отражения и облучённости. Для дальней части ИК-спектра существенно собственное излучение объектов, а распределение лучистости по их площади зависит от распределения коэффициентов излучения и температуры.

При моделировании фона необходимо учесть, что ИК-излучение также имеет две составляющие: собственное тепловое излучение и отражённое излучение Солнца и других внешних источников. В диапазоне длин волн менее 3 мкм доминирует отражённое и рассеянное солнечное излучение и можно пренебречь собственным тепловым излучением фонов. Наоборот, в диапазоне длин волн более 4 мкм преобладает собственное тепловое излучение фонов и можно пренебречь отражённым солнечным излучением. Диапазон длин волн 3–4 мкм является переходным. В нём наблюдается отчётливо выраженный минимум яркости фоновых образований.

Ориентировочные схемы построения стенда. Схема имитационно-моделирующего комплекса, основанного на управляемом массиве микрзеркал, представлена на рис. 1. Программное обеспечение, установленное на ЭВМ 1, по исходным данным производит расчёт имитационного инфракрасного тестового видеоизображения, которое направляется через устройство сопряжения 5 на оптический модулятор 4, освещаемый источником ИК-излучения 2 со своим блоком управления абсолютно чёрным телом (БУ АЧТ) с помощью

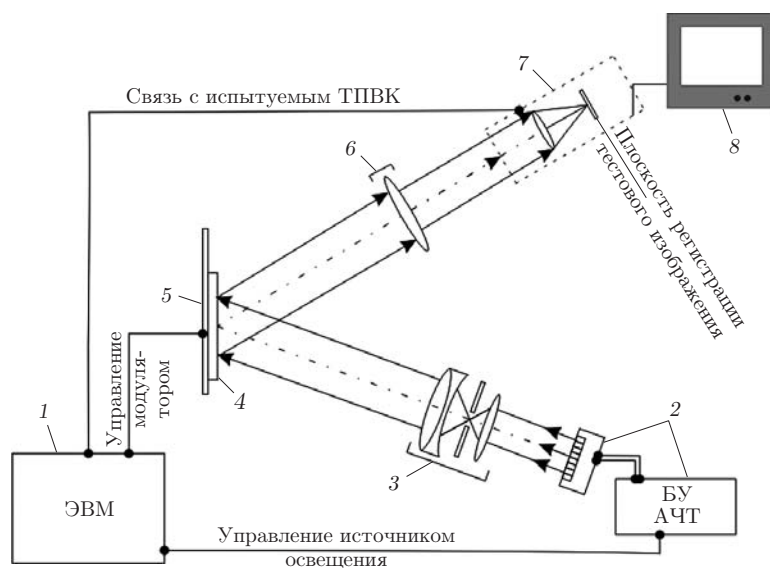


Рис. 1

конденсорной оптической системы 3. Тестовое инфракрасное изображение, формируемое модулятором 4, через оптическую систему 6 проецируется на входное окно испытуемого ТПВК 7. Изображение тестовой имитационной картинке, регистрируемое ТПВК, выводится на монитор 8 и одновременно на ЭВМ 1 для сравнения с исходным тестовым сигналом.

Возможны другие схемы имитационно-моделирующего стенда. На рис. 2 представлена общая структура комплекса, основанного на двух массивах резистивных элементов. Массив излучателей 1 формирует тепловизионное изображение «объекта», направляемое оптической проецирующей системой 2 и светоделителем 5 на испытуемый тепловизионный комплекс 6. Массив излучателей 3 генерирует фон тестового изображения, который с помощью проецирующей системы 4 также направляется на испытуемый ТПВК 6. Для независимой регулировки яркости проецирующие системы 2 и 4 снабжены сменными фильтрами. Регистрацию сигнала испытуемого ТПВК и управление обоими излучателями выполняет ЭВМ 7.

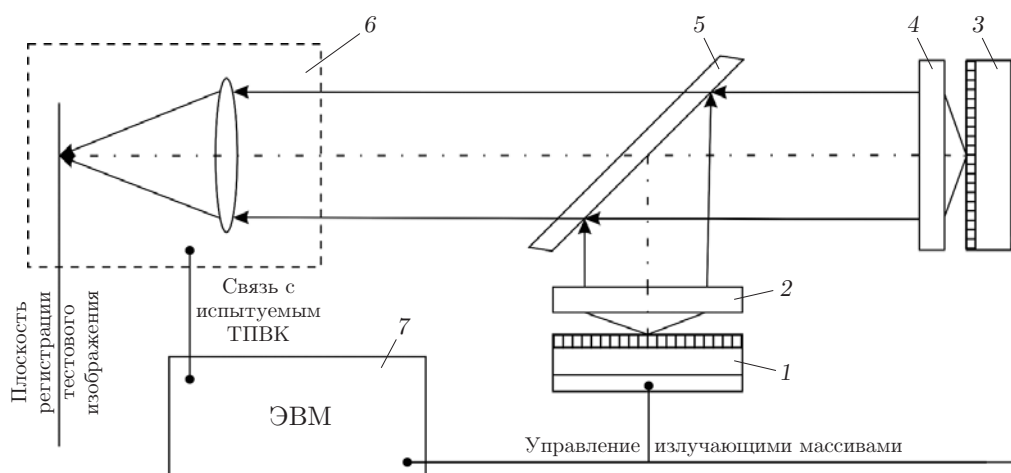


Рис. 2

Кроме технологических трудностей производства каждая из схем построения стенда имеет свои преимущества и недостатки.

Стенд генерирования инфракрасной динамической сцены может быть собран на основе DMD-проектора видимого диапазона.

Заключение. Задача создания динамического проектора инфракрасной сцены является ключевой при разработке и тестировании высокоразрешающих тепловизионных и теплопеленгационных комплексов. В настоящее время в России нет систем генерации динамических сцен, близких по характеристикам к зарубежным аналогам. Создание подобных отечественных стендов крайне необходимо для дальнейшего развития отечественного тепловизионного приборостроения. При выборе способов построения таких стендов следует учесть, что наиболее универсальным является вариант с комбинацией отражающих микрзеркал и излучающей панели. Он даёт возможность моделировать практически любые варианты излучающих тел с различными теплоизлучающими способностями на произвольном фоне. Особенно интересны варианты с секторным модулятором, используемые для генерации цветных изображений в видимой области. Они позволяют моделировать теплоизлучение в нескольких диапазонах длин волн. Что же касается моделирующих устройств только с теплоизлучающими элементами, то они пригодны для генерации более простых сцен, в которых присутствуют тела с равномерной излучающей способностью, но с различной температурой. Фон в этом случае может быть только равномерным (по излучательной способности). Для технического исполнения первый вариант существенно сложнее и соответственно дороже, но окупается универсальностью. Однако следует отметить, что его реализация облегчается массовым выпуском проекторов, использующих DLP-технологии. Доработка такого проектора заключается в замене элементов оптического тракта, действующих в видимом диапазоне, элементами, работающими в инфракрасном диапазоне. Прежде всего, это замена излучающего элемента — вместо ламп или светодиодов в видимом диапазоне требуются ИК-излучатели или даже АЧТ с соответствующими фильтрами. Кроме того, необходима смена защитного стекла DLP-блока и объективов. Такой модифицированный проектор может стать основой для построения моделирующего комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oleson J., James J., LaVeigne J. et al.** Large format resistive array (LFRA) infrared scene projector (IRSP) performance and production status // Proc. SPIE. 2006. **6208**. 620810.
2. **Cole J. S., Jolly A. C.** Hardware-in-the-loop simulation at the U. S. Army Missile Command // Proc. SPIE. 1996. **2741**. P. 14–19.
3. **Beasley D. B.** Technologies for synthetic environments: Hardware-in-the-loop testing X // Proc. SPIE. 2001. **5785**. P. 68–79.
4. **Presnar M. D., Raisanen A. D., Pogorzala D. R. et al.** Dynamic scene generation, multimodal sensor design, and target tracking demonstration for hyperspectral/polarimetric performance-driven sensing // Proc. SPIE. 2010. **7672**. 76720T.

Поступила в редакцию 13 апреля 2011 г.
