

КАЛИБРОВКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОЛЛИМАТОРНЫХ СТЕНДОВ ПО РАЗНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР

© 2007 г. Е. И. Алешко; В. И. Курт, канд. техн. наук; Л. Р. Рахимова

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Представлены описание установки и метод калибровки дифференциальных коллиматорных стендов по разности радиационных температур (РРТ). Метод позволяет исключить влияние коэффициента модуляции яркости изображения периодического тест-объекта на результаты измерений истинных значений РРТ. Калибровки коллиматорных стендов на макете установки показали перспективность ее использования при метрологическом обеспечении тепловизионных приборов.

Коды OCIS: 120.5630.

Поступила в редакцию 20.12.2005.

В практике метрологического обеспечения тепловизионных приборов (ТВП) для измерения минимально обнаруживаемой разности радиационной температуры (РРТ), минимально разрешаемой РРТ, нормированного температурного разрешения применяются стенды и контрольно-поверочная аппаратура (КПА). Стенды представляют собой зеркальные или линзовые коллиматоры, в фокальной плоскости которых устанавливаются тест-объекты (штриховые миры, квадратные излучатели и др.) с возможностью задания им требуемых значений РРТ [1, 2].

Для обеспечения единства и достоверности определения упомянутых параметров ТВП эти стенды должны обладать определенными метрологическими характеристиками, полученными на этапах их построения и метрологической аттестации (сертификации), а именно имитируемая РРТ на выходе стендов и КПА должна быть “привязана” к эталонному излучателю типа модели черного тела (МЧТ), расположенному на верхней ступени поверочной схемы, и определена с допустимой погрешностью 0,02 К (перспективные требования к этой погрешности 0,01–0,001 К).

Как показала практика, поэлементная сертификация коллиматорных стендов и КПА по РРТ (расчетно-экспериментальный метод) отягощена большими погрешностями в связи с многофункциональной зависимостью РРТ на выходе стенда от его конструктивных особенностей (не будем здесь их перечислять). Зачастую различия между расчетной и измеренной напрямую разностями температур коллиматорного стенда достигают 50%.

Метод измерения РРТ коллиматорных стендов радиометрами тепловизионного типа с построением изображения тест-объекта в режиме реального времени содержит избыточную информацию и не способствует реализации высокой пороговой чувствительности по температуре из-за широкой частотной полосы, в которой формируется полезный сигнал.

Возможно использование метода “точечного” радиометра с последовательным дискретным перемещением его поля зрения относительно элементов тест-объекта коллиматорного стенда [3, 4]. В таком радиометре можно использовать приемно-регистрирующую систему с узкой полосой частот и, следовательно, с меньшим уровнем шумов, что позволит реализовать более высокую пороговую чувствительность. Но этот метод не дает информации о коэффициенте модуляции яркости в изображении тест-объекта, который, как правило, меньше единицы. Поэтому измерение РРТ этим методом будет отягощено погрешностью, величина которой зависит от коэффициента модуляции изображения, формируемого системой коллиматорный стенд–радиометр.

Такую информацию можно получить, проводя запись температурного профиля тест-объекта и обработкой этой информации по методу, изложенному ниже.

На рис. 1 показана схема установки, составленная из широкодоступных комплектующих и позволяющая нормировать РРТ на выходе стенда или КПА, имитирующего тест-объект в виде 4-шпальной миры.

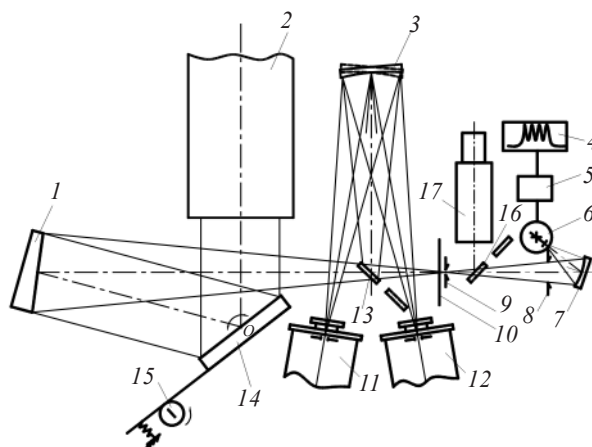


Рис. 1. Оптическая схема установки для измерения РРТ. Пояснения см. в тексте.

Изображение тест-объекта калибруемого коллиматорного стенда 2 с помощью качающегося плоского зеркала 14 и внеосевого параболического зеркала 1 ($D_{\text{св}} = 150 \text{ мм}, f = 750 \text{ мм}$) фокусируется на входной щели радиометра-компаратора, состоящего из модулятора 10 ($f_m = 1000 \text{ Гц}$), узла регулируемой по ширине и высоте щели (типа спектральной) 9, эллипсоидального зеркала 7 ($\beta = -0,33^\times$), охлаждаемого жидким азотом фотоприемного устройства (ФПУ) на базе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур 6, усилителя с синхронным детектором 5. Перед эллипсоидальным зеркалом устанавливается сменная диафрагма 8, ограничивающая апертуру радиометра в случаях, когда сечение пучка калибруемого прибора меньше светового диаметра зеркала 1. Для облегчения юстировки поверяемого коллиматорного стенда (с зеркальной оптикой) за анализирующей щелью устанавливается плоское зеркало 16 и визирное устройство 17, которое дает возможность наблюдать изображение мира в плоскости щели. С помощью качания зеркала 14 вокруг оси O , которое осуществляется эксцентриком 15, изображение тест-объекта движется относительно анализирующей щели радиометра. За один оборот эксцентрика ($\sim 1 \text{ мин}$) изображение проходит дважды через анализирующую щель радиометра. На выходе усилителя с синхронным детектором формируется аналоговый сигнал в частотной полосе $\sim 10 \text{ Гц}$, амплитуда которого пропорциональна разности яркостей (радиационных температур) элементов тест-объекта. Скорость сканирования тест-объекта согласована с постоянной времени синхронного детектора. Далее сигнал проходит на плату, которая сопряжена с компьютером (типа машинной станции) 4. Плата аналогово-цифрового преобразователя Lcard 783 работает в режиме самописца, и на дисплее компьютера отображается запись температурного профиля тест-объекта.

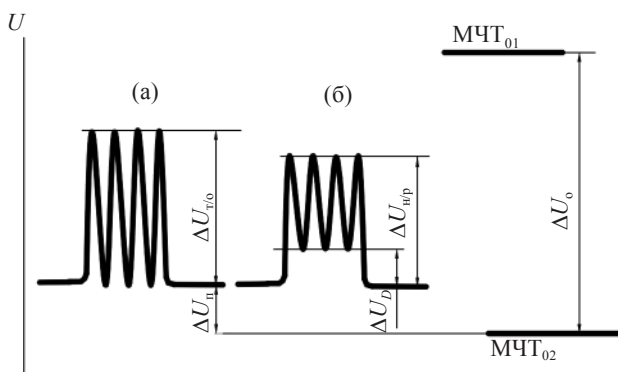


Рис. 2. Температурный профиль периодического тест-объекта и уровни яркости МЧТ. а – коэффициент модуляции равен единице, б – коэффициент модуляции менее единицы.

Для градуировки РРТ, по окончании записи тест-объекта, на анализирующей щели экспонируются опорные излучатели (МЧТ) 11 и 12. Для этого в ход лучей вводится плоское зеркало 13 и переключением сферического зеркала 3 через анализирующую щель подается поочередно излучение от обоих излучателей, которое также регистрируется электронным самописцем. Выходная апертура обоих каналов (коллиматорного и опорного) одинакова, оптическое покрытие зеркал – также. Периодически коэффициент асимметрии каналов ($Q = \rho_k / \rho_o$) проверяется. В итоге на экране компьютера отображается запись температурного профиля тест-объекта и уровней яркости МЧТ (рис. 2). Сигналы самописца с заданной выборкой записываются в память компьютера.

Амплитуда сканирования по тест-объекту устанавливается в зависимости от его пространственной частоты регулировкой эксцентрика таким образом, чтобы, как минимум, с одной стороны структуры мира был выход анализирующей щели радиометра на “полку” фона. При этом размер полки должен быть больше, чем два элементарных поля зрения щели радиометра.

Разность радиационных температур рассчитывается по формуле (для РРТ $\leq 5 \text{ К}$)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta U_{\text{т/о}} \Delta T_o}{\Delta U_o Q}, \quad (1)$$

где ΔU_o – разность сигналов между опорными излучателями; ΔT_o – разность температур между опорными излучателями; $\Delta U_{\text{т/о}}$ – разность сигналов между элементами тест-объекта; Q – коэффициент асимметрии каналов.

При глубине модуляции сигналов тест-объекта менее единицы истинный размах сигналов восстанавливается по формуле

$$\Delta U_{\text{т/о}} = \Delta U_{\text{н/р}} + \Delta U_d, \quad (2)$$

где $\Delta U_{\text{н/р}}$ – разность сигналов между фоновой “полкой” и вершиной сигналов, ΔU_d – разность сигналов между фоновой “полкой” и нижними значениями сигналов от тест-объекта.

Значение $\Delta U_{\text{т/о}}$, полученное по формуле (2), подставляют в формулу (1) и определяют истинную ΔT_m на недоразрешенном тест-объекте.

Далее определяют радиационную температуру фонового излучателя тест-объекта (температуру “привязки”):

$$T_{\text{мф}} = T_{\text{о1,о2}} + \frac{\Delta U_{\text{н}} \Delta T_o}{\Delta U_o Q}, \quad (3)$$

где $T_{\text{о1,о2}}$ – температура опорного МЧТ (“холодного” или “горячего”), $\Delta U_{\text{н}}$ – разность сигналов меж-

ду фоновой “полкой” тест-объекта и одного из опорных МЧТ (берется со своим знаком).

При измерении больших разностей температур (10–30 К) и при фиксированной разности температур опорных МЧТ для уменьшения погрешности измерений, связанной нелинейностью зависимости $U_c = f(T)$, в расчетах ΔT_m необходимо использовать редуцированные яркости. Для этого в память компьютера предварительно должна быть введена функция (в табличном или аналитическом виде), связывающая температуру МЧТ с его редуцированной яркостью в системе компаратора:

$$L_p = f(T), \quad L_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda S_\lambda \rho_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

где L_λ – спектральная плотность яркости МЧТ при температуре T_i , S_λ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения компаратора, ρ_λ – суммарный спектральный коэффициент отражения зеркал компаратора.

Редуцированная яркость рассчитывается для ряда температур МЧТ с шагом 1 К и табулируется. Значения температур в долях менее 1 К рассчитываются линейной интерполяцией или используя аппроксимирующую функцию. Затем определяется разность редуцированных яркостей $\Delta L_{m/\phi}$ между элементами тест-объекта и редуцированная яркость фонового элемента $L_{p\phi}$ (по алгоритму, приведенному выше, только вместо температур и их разностей используются редуцированные яркости). Далее редуцированная яркость активного элемента тест-объекта определяется как

$$L_{pm} = L_{p\phi} + \Delta L_{m/\phi}. \quad (5)$$

По зависимости $L_p = f(T)$ определяются температуры T_m и T_ϕ и вычисляется их разность.

Это алгоритм одного цикла измерений РРТ. Для определения погрешности измеряемой РРТ необхо-

димо провести не менее 10 циклов измерений, определить случайную и систематическую погрешности, а также их композицию.

Эксплуатация установки, аналогичной представленной, показала, что погрешность измерений РРТ составляет 3–5% от определяемой РРТ.

Необходимо отметить, что ГОСТ 8.106-2001 не дает оснований для достижения абсолютных погрешностей порядка 0,01–0,02 К и для прецизионных калибровок необходимо сличение между собой МЧТ, работающих в паре в качестве опорных, на стадии их калибровки по вышестоящему эталонному излучателю. В перспективе для такого типа измерений требуется эталон разности радиационных температур с погрешностью воспроизведения РРТ не более 0,005 К.

В заключение отметим, что настоящая схема пригодна и для работы в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Для этого необходимо заменить ФПУ, работающие в области спектра 8–14 мкм, на ФПУ, работающие в области 3–5 мкм, а также провести калибровку и сличение между собой опорных излучателей в области 3–5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаенко А.Г. Аппаратура для оценки характеристик тепловизионных систем // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 19–25.
2. Бугаенко А.Г., Курт В.И., Малевич П.М. Стенд НСИ-К // Тезисы 2-й научно-техн. конф. “Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации”. Мытищи, 1999. С. 94.
3. Афанасьев В.А., Алешко Е.И., Курт В.И., Новоселов В.А. Инфракрасный компаратор К-100 // ОМП. 1986. № 3. С. 15–17.
4. Ялышев Ф.Х. Метрологическое обеспечение тепловизионных измерений. Тезисы докладов 6-й научно-техн. конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М.: ВНИИОФИ, 1986. С. 89.