

УДК 621.397

Измерение температуры двухдиапазонным тепловизионным прибором на основе матричных фотоприемных устройств

Л. И. Горелик, В. Н. Соляков, Д. Ю. Тренин, Е. О. Тренина

Разработан двухдиапазонный тепловизионный прибор, работающий в спектральных диапазонах 3—5 и 8—12 мкм, на основе матричных фотоприемных устройств формата 256×256 элементов, позволяющий производить измерение температуры объектов и их коэффициентов излучения. Описан ряд проведенных с помощью прибора измерений, приводится метод определения температуры и коэффициента излучения.

PACS: 42.79.Ag, 72.20.Jv, 07.57.Kp, 61.80.Ba

Ключевые слова: двухдиапазонный тепловизор-радиометр, MWIR/LWIR, МФПУ, температура.

Введение

Бесконтактное измерение температуры является приоритетным и зачастую единственно возможным способом контроля состояния объектов во многих отраслях промышленности, строительства и энергетики. Бурное развитие тепловизионной техники привело к появлению на рынке огромного количества тепловизоров, формирующих изображение в инфракрасной области спектра. Такие изображения, представляющие собой распределение яркости наблюдаемых объектов, позволяют производить диагностику утечек тепла из зданий, перегрева узлов электрических сетей и пр., т. е. предоставляют качественную информацию о наблюдаемых объектах в категориях "теплее—холоднее". Для количественной оценки необходимо использование радиометров, использующих в своей работе градуировочные кривые, которые связывают регистрируемый световой поток с температурой объекта.

Преимущество тепловизора-радиометра — способность строить двумерное распределение температуры по наблюдаемой сцене. Такое представление информации удобнее для оператора, так как нет необходимости проводить поточечное "нацеливание" на объекты сцены, как в случае одноэлементных радиометров (пирометров). В основе работы как одноэлементных, так и многоэлементных радиометров используется фундаментальный

принцип зависимости энергии излучения (светового потока) от температуры нагретого объекта. Принципиальной проблемой, которая возникает при измерениях, является зависимость регистрируемой энергии не только от температуры объекта, но и от ряда других параметров, сложно поддающихся оценке, в том числе и в части коэффициента излучения. Погрешности в определении температуры, возникающие из-за неопределенности в величине коэффициента излучения, пропускания атмосферы, наличия других поглощающих сред между источником излучения и регистрирующим прибором, могут быть исключены за счет добавления уравнений, связывающих эти параметры в различных спектральных диапазонах. В результате проведенных исследований было показано, что для устранения влияния этих неопределенностей при определенных допущениях достаточно иметь два уравнения. Такие уравнения предоставляет возможность сформулировать двухдиапазонная измерительная система.

В данной работе описывается разработанный в ФГУП «НПО "Орион"» двухдиапазонный тепловизионный прибор, который позволяет производить измерение температуры объектов и строить двумерное распределение температуры и коэффициента излучения по сцене. Основу фотоприемной части прибора составляют два независимых матричных фотоприемных устройства (МФПУ) формата 256×256 элементов, чувствительных в средней (MWIR) и длинноволновой (LWIR) части инфракрасного спектра.

Математическая модель

При измерении величины регистрируемого прибором излучения следует учитывать две составляющие, а именно, собственное излучение объекта, характеризующее его температуру, и отраженное от него излучение [1]. Сигнал U с реги-

Горелик Леонид Иосифович, главный научный сотрудник.
Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник.
Тренин Дмитрий Юрьевич, начальник НТЦ.
Тренина Елена Олеговна, инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел. (499) 373-55-70. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 16 августа 2011 г.

© Горелик Л. И., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю., Тренина Е. О., 2012

стрирующего прибора будет определяться следующим образом:

$$U \sim \varepsilon R(T) + \rho R(T_0), \quad (1)$$

где ε — коэффициент излучения объекта;

ρ — коэффициент отражения;

$R(T)$ — плотность потока излучения объекта при температуре T ;

$R(T_0)$ — плотность потока излучения окружающих предметов при эквивалентной температуре T_0 (температура "фона").

Как известно, сумма коэффициента излучения и коэффициента отражения равна единице при условии непрозрачности объекта:

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (2)$$

Коэффициент ε характеризует долю поглощаемого объектом излучения. При $\varepsilon = 1$ все падающее на тело излучение поглощается и такое тело называется черным. При $\varepsilon = 0$ все излучение отражается и тело представляет собой идеальное зеркало.

При проведении процедуры градуировки радиометра определяется зависимость $U = U(W)$, где W — плотность полного потока регистрируемого излучения. Поэтому с учетом (2) можно записать, что

$$W(T, T_0) = \varepsilon R(T) + (1 - \varepsilon) R(T_0). \quad (3)$$

Для двухдиапазонного тепловизора-радиометра (например, чувствительного в MW — средневолновом и LW — длинноволновом диапазонах спектра) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} W_{MW} = \varepsilon_{MW} R_{MW}(T) + (1 - \varepsilon_{MW}) R_{MW}(T_0); \\ W_{LW} = \varepsilon_{LW} R_{LW}(T) + (1 - \varepsilon_{LW}) R_{LW}(T_0). \end{cases} \quad (4)$$

Как видно, система (4) имеет не два неизвестных, а четыре. Помимо неизвестной температуры исследуемого объекта T , неизвестна температура фона T_0 . К тому же зачастую коэффициент излучения зависит от длины волны.

Температуру окружающей среды можно определить, например, по "нулевому кадру" в момент теплового равновесия объектов сцены. В этот момент $T = T_0$, и $W = \varepsilon R(T_0) + (1 - \varepsilon) R(T_0) = R(T_0)$.

Если сделать предположение о независимости коэффициента излучения от длины волны $\varepsilon_{MW} = \varepsilon_{LW} = \varepsilon$ (что справедливо для черных и серых тел), то после преобразования системы (4) и деления первого уравнения на второе можно получить не зависящее от коэффициента излучения соотношение:

$$\begin{cases} W_{MW} - R_{MW}(T_0) = \varepsilon [R_{MW}(T) - R_{MW}(T_0)], \\ W_{LW} - R_{LW}(T_0) = \varepsilon [R_{LW}(T) - R_{LW}(T_0)]; \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{W_{MW} - R_{MW}(T_0)}{W_{LW} - R_{LW}(T_0)} = \frac{R_{MW}(T) - R_{MW}(T_0)}{R_{LW}(T) - R_{LW}(T_0)}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) по спектральному отношению можно определить температуру объекта ("цветовая" температура).

После найденного из уравнения (6) значения температуры возможно определение коэффициента излучения объекта. Для этого найденное значение температуры необходимо подставить в одно из уравнений системы (5). В этом заключается преимущество двухдиапазонной ИК-системы по сравнению с однодиапазонной.

Применение описанной схемы измерения для селективных источников ($\varepsilon_{MW} \neq \varepsilon_{LW}$) требует модификации, а именно, необходимо ввести поправочный коэффициент, характеризующий отношение коэффициентов излучения тела в двух диапазонах. Для этого необходимо знать величину коэффициентов излучения в этих диапазонах. Однако в этом случае достаточно проведения измерений в одном спектральном диапазоне, так как уравнение (3) в этом случае имеет одну неизвестную. На практике ситуация с наличием полной информации о коэффициенте излучения объекта встречается крайне редко, поэтому введение поправок в общем случае затруднено.

Для ряда частных случаев введение поправочного коэффициента, равного отношению коэффициентов излучения в двух диапазонах, возможно. В работе было проведено исследование величины этого отношения для различных металлов, излучательные характеристики которых хорошо изучены [2]. О методе и результатах этих исследований изложено далее в данной работе.

Следует отметить, что помимо коэффициента излучения на величину регистрируемой энергии влияют и другие факторы: индикатриса излучения, наличие дополнительных поглощающих сред на линии визирования (например, технологических окон) и т. п. В том случае, если эти факторы пропорционально изменяют значения регистрируемых сигналов в рабочих диапазонах, отношение (6) слабо от них зависит. Таким образом, устраняется необходимость их учета.

Описание прибора

Созданный тепловизионный прибор (рис. 1) подробно описан в [3]. Основу фотоприемной части тепловизора-радиометра составляют МФПУ на

основе InSb (MWIR) и KPT (LWIR). Спектральные характеристики чувствительности каналов тепловизора-радиометра представлены на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид двухдиапазонной тепловизионной системы для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм

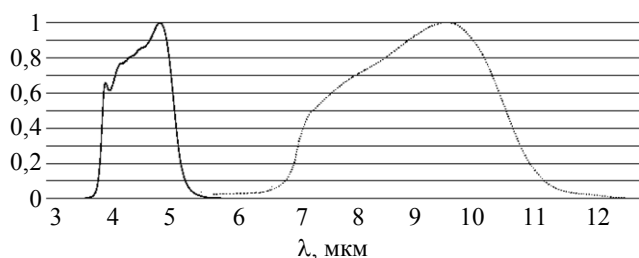


Рис. 2. Спектральные характеристики чувствительности каналов (сплошная линия — MWIR, прерывистая — LWIR)

Основные характеристики прибора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	LWIR	MWIR
Спектральный диапазон, мкм	8—12	3—5
Материал фоточувствительного слоя	KPT	InSb
Формат	256×256	256×256
Шаг ФЧЭ, мкм	30	35
NEDT, мК	30	20
Рабочая температура, К	80	80
Частота кадров, Гц	50	50

Исследование коэффициентов излучения металлов

Полный поток излучения W , описанный формулой (3), выражается следующим образом:

$$W(T, T_0) = \int_{\Delta\lambda} \epsilon(\lambda, T) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda + \int_{\Delta\lambda} (1 - \epsilon(\lambda, T)) \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda. \tag{7}$$

Здесь $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$ — спектральная плотность потока излучения черного тела (определяется зако-

ном Планка); $S(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности прибора. Интегрирование производится по диапазону чувствительности прибора. В таком виде формулу (7) использовать для расчетов неудобно, так как вид зависимости $\epsilon(\lambda, T)$ определить крайне проблематично. Поэтому вместо записи (7) будем использовать следующее выражение:

$$W(T, T_0) = \epsilon_{\Delta\lambda}(T) \int_{\Delta\lambda} \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda + (1 - \epsilon_{\Delta\lambda}(T)) \int_{\Delta\lambda} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda, \tag{8}$$

где

$$\epsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\int \epsilon(\lambda, T) \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} S(\lambda) d\lambda} \tag{9}$$

есть эквивалентный интегральный для диапазона $\Delta\lambda$ коэффициент излучения, зависящий как от температуры, так и от характеристик применяемого прибора.

На основании исходных данных из [2] и формулы (9) определялось отношение ξ эквивалентных коэффициентов излучения в длинноволновом и средневолновом диапазонах спектра с учетом характеристик чувствительности тепловизора-радиометра (представленных на рис. 2) для различных металлов при различных температурах. Результаты вычисления сведены в табл. 2. Последний столбец — среднее значение ξ для каждого материала, вычисленное по приведенным величинам.

Таблица 2

$T, ^\circ\text{C}$	273	293	400	500	600	700	800	900	1000	
Алюминий	1,398	1,384	1,378	1,38	1,408	1,404	1,356	1,387	1,373	1,38
Медь	1,359	1,336	1,388	1,387	1,39	1,37	1,371	1,375	1,351	1,37
Золото	1,388	1,379	1,373	1,362	1,392	1,391	1,386	1,385	1,384	1,38
Олово	1,40	1,388	1,389	1,382	—	—	—	—	—	1,39
Никель	1,385	1,382	1,372	1,38	1,376	1,379	1,367	1,371	1,375	1,38
Нихром	1,355	1,349	1,344	1,339	1,34	1,335	1,337	1,336	1,339	1,34
Сталь легированная	1,306	1,289	1,269	1,274	1,282	1,31	1,296	1,306	1,308	1,30
Сталь строительная	1,353	1,357	1,369	1,368	1,367	1,352	1,365	1,364	1,363	1,36
Сталь мягкая	1,367	1,364	1,364	1,348	1,356	1,351	1,356	1,335	1,341	1,35
Бронза	1,372	1,341	1,376	1,374	1,371	1,38	1,39	1,388	1,357	1,37
Свинец	1,392	1,345	1,361	1,381	1,375	—	—	—	—	1,37
Вольфрам	1,372	1,362	1,364	1,365	1,363	1,361	1,349	1,353	1,347	1,36

Существенным результатом исследований является то, что с погрешностью, не превышающей 3 %, отношение эквивалентных коэффициентов излучения в длинноволновом и средневолновом диапазонах спектра является одинаковым для представленных в таблице материалов. Это позволяет ввести поправочный коэффициент $\xi = 1,36$ в уравнение (6):

$$\frac{W_{MW} - R_{MW}(T_0)}{W_{LW} - R_{LW}(T_0)} = \xi \frac{R_{MW}(T) - R_{MW}(T_0)}{R_{LW}(T) - R_{LW}(T_0)}. \quad (10)$$

На основании вышеизложенного в двухдиапазонный тепловизор-радиометр следует внести дополнительное функциональное устройство, позволяющее учитывать поправочный коэффициент при индикации температурного распределения. Таким образом, можно реализовать два вида отображения сцены. В этом случае оператору, работающему с двухдиапазонным прибором, остается делать выбор между двумя способами отображения:

если объектом интереса являются металлические детали ($\xi = 1,36$), то отображаемая температура всех остальных предметов будет слегка завышенной;

если металлические объекты не являются предметом интереса ($\xi = 1$), то их температура будет слегка заниженной.

Измерение температуры нагретых тел

Для демонстрации возможности измерения температуры с помощью двухдиапазонной системы был проведен ряд экспериментов. Объектом исследования являлась металлическая пластина, нагреваемая до некоторой температуры (рис. 3). Металлическая пластина 2 располагалась на фоне 1. К пластине прикреплялся термодатчик 3 для контроля истинного значения ее температуры. Эти значения затем сверялись с результатами измере-

ния. Характерной особенностью пластины являлось наличие загрязненного участка 4.

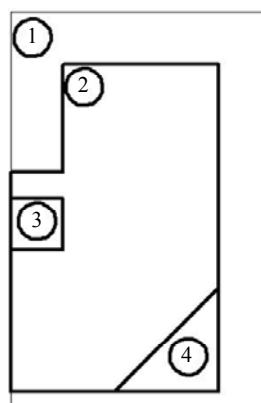


Рис. 3. Схематическое представление исследуемого объекта:

- 1 — фон; 2 — пластина;
- 3 — термодатчик;
- 4 — загрязненный участок

На рис. 4 приведены изображения пластины в двух рабочих спектральных диапазонах прибора. Хотя температура всей пластины одинакова во всех ее частях, некоторые области кажутся холоднее или горячее. Это объясняется неодинаковостью коэффициентов излучения разных областей за счет наличия загрязнения, окислов и т. п.

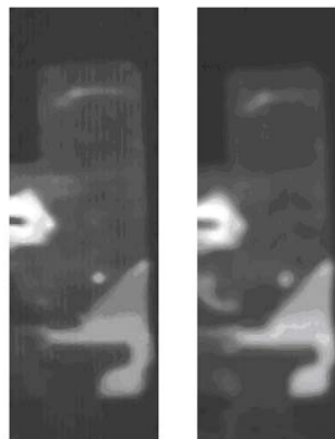


Рис. 4. Тепловизионное изображение металлической пластины в MWIR (слева) и LWIR (справа) диапазонах

Перед началом измерений проводилась градуировка прибора, которая заключалась в измерении

величин сигналов при регистрации излучения черного тела с заданной температурой. На основе полученных данных строились две зависимости. Первая связывала температуру черного тела с сигналом в одном из каналов (например MWIR), вторая связывала сами сигналы в двух каналах:

$$\begin{aligned} U_{MW} &= U_{MW}(T); \\ U_{LW} &= U_{LW}(U_{MW}). \end{aligned} \quad (11)$$

В диапазоне линейности зависимости выходных сигналов от падающего излучения соотношения (6) и (10) эквивалентны соотношениям

$$\frac{\bar{U}_{MW} - U_{MW}(T_0)}{\bar{U}_{LW} - U_{LW}(T_0)} = \frac{U_{MW}(T) - U_{MW}(T_0)}{U_{LW}(U_{MW}) - U_{LW}(T_0)}, \quad (12)$$

$$\frac{\bar{U}_{MW} - U_{MW}(T_0)}{\bar{U}_{LW} - U_{LW}(T_0)} = \xi \frac{U_{MW}(T) - U_{MW}(T_0)}{U_{LW}(U_{MW}) - U_{LW}(T_0)}, \quad (13)$$

где \bar{U} — зарегистрированный сигнал, $U_{MW}(T)$ — величина, подлежащая определению.

Для решения уравнения (13) оно записывается в виде

$$\begin{aligned} \xi [U_{MW}(T) - U_{MW}(T_0)] [\bar{U}_{LW} - U_{LW}(T_0)] - \\ - [\bar{U}_{MW} - U_{MW}(T_0)] [U_{LW}(U_{MW}) - U_{LW}(T_0)] = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

а затем решается численными методами.

По найденному значению S_{MW} и зависимости (11) определяется температура объекта. Эффективный коэффициент излучения объекта в средневолновом диапазоне ϵ_{MW} определялся из соотношения

$$\epsilon_{MW} = \frac{\bar{U}_{MW} - U_{MW}(T_0)}{U_{MW}(T) - U_{MW}(T_0)}, \quad (15)$$

а эффективный коэффициент излучения объекта в длинноволновом диапазоне ϵ_{LW} отличался от ϵ_{MW} в ξ раз:

$$\epsilon_{LW} = \xi \epsilon_{MW}. \quad (16)$$

Результат индикации рассчитанных параметров представлен на рис. 5. Левое изображение является картой распределения температуры. На нем отчетливо видно, что температура пластины одинакова для всех ее частей. Значение температуры, определенное с помощью прибора, оказалось равным 45 °С при показаниях термодатчика 46,1 °С. Правое изображение — карта коэффициентов из-

лучения. Металлическая пластина имеет низкий коэффициент излучения, что подтверждается низким значением ее яркости (на рис. 5 справа). Загрязненная часть имеет большую яркость, что свидетельствует о большем коэффициенте излучения этой области. Следует отметить, что индикация распределения температуры и коэффициента излучения более удобна для оператора в цветовой палитре, что обуславливается физиологическими особенностями цветовосприятия.

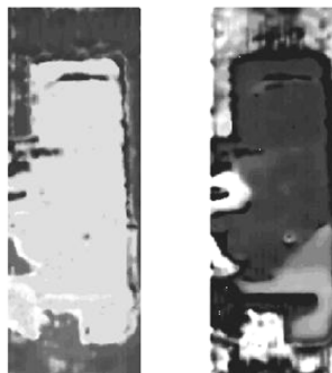


Рис. 5. Карта распределения температуры (слева) и коэффициента излучения (справа)

Заключение

Как показали исследования, двухдиапазонный тепловизионный прибор на основе МФПУ имеет ряд функциональных преимуществ перед однодиапазонными и тем более одноэлементными пирометрами, поскольку такой прибор позволяет производить измерения температуры с неявным учетом коэффициентов излучения материалов, т. е. без непосредственного участия оператора, задающего значения коэффициентов излучения из таблиц. Это позволяет получать значения, близкие к реальным значениям температуры объектов. Дополнительным преимуществом является возможность оценки величины коэффициента излучения объекта, что может найти применение в ряде отраслей промышленности, например, при определении степени загрязнения металлических поверхностей.

Работа проводилась при поддержке
Российского Фонда Фундаментальных
Исследований (РФФИ).

Литература

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение. — М.: Мир, 1988.
2. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Т. 1. — М.: Наука, 1964.

3. Горелик Л. И., Дрогайцева Е. В., Полесский А. В., Сидорин А. В., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 92.

Temperature measurement with the dual-band thermal imaging system based on FPAs

L. I. Gorelik, V. N. Solyakov, D. Yu. Trenin, E. O. Trenina
Orion Research-and-Production Association,
46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

The dual-band thermal imaging system for spectral ranges 3—5 and 8—12 μm based on mass-produced FPAs (format of matrix photodetectors is 256×256 pixels) have been developed in Orion Research-and-Production Association. System allows providing measurements of the color temperature and emissivity of the objects. This article contains description of a number of performed measurements. Methodology of temperature and emissivity definition using dual-band thermal imaging system is described.

PACS: 42.79.Ag, 72.20.Jv, 07.57.Kp, 61.80.Ba

Keywords: dual-band thermal imager and radiometer, MWIR/LWIR, FPA, temperature.

Bibliography — 3 references.

Received August 16, 2011