

УДК 536.52

ТЕРМОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Дубас Л.Г.

Физико-химическая лаборатория «НИИДП» РАСХН, Истра, e-mail: sudarih@gmail.com

Предлагается метод измерения температуры, с целью уменьшения погрешности измерений и увеличения точности бесконтактного измерения. Существенной особенностью предлагаемого метода является возможность использования двухступенчатого подхода с предварительной или дополнительной регистрацией состояния системы и теплового излучения для уточнения измерения температуры.

Ключевые слова: температура, тепловое излучение, спектральное или термическое отношение, коррекция.

THERMOPHYSICAL BASES OF RADIOMETRIC TEMPERATURE MEASUREMENTS

Dubas L.G.

Physico-chemical laboratory «NIIDP» RAAS, Istra, e-mail: sudarih@gmail.com

A radiometric temperature measurement with use of the thermal relation's factors is possible. For changing «radiometrical» coefficients the effect of evaluations corresponds to approximate «radiometric» temperature. For increase in reliability of results and expansion of a scope of pyrometry it is necessary to lower influence of relative uncertainty of the spectral relation's factor's on results of measurement. The method of temperature measuring, for the purpose of diminishing of a measuring error and increase in accuracy of noncontact measuring is offered. Essential feature of an offered method is possibility of the two-level approach use with preliminary or additional registration of a system status and thermal radiation for improvement of temperature measuring.

Keywords: temperature, thermal radiation, the spectral or thermal relation, correction

Оптические методы регистрации светового излучения для измерения температуры [3–7] могут применяться как в диапазоне сравнительно невысоких температур (здесь меньше температуры плавления хрома), так и высоких температур. Вполне актуальным является развитие термопирометрии [1] для измерения действительных температур. Под термической пирометрией здесь понимается «радиометрическая» термометрия спектрального и термического отношения, для которой ниже изложены вычислительные формулы.

Одними из возможных устройств измерения электромагнитного излучения являются спектральные фотометры или радиометры [3].

Цель работы заключается в теоретическом представлении возможности измерения температуры с использованием калиброванных устройств основанных на измерении теплового электромагнитного излучения, регистрируемого в полихроматическом или спектральном фотометре или радиометре.

1. Тепловое излучение

Действительные температуры измеряются по оптическому излучению с использованием свойств функции Планка, описывающей тепловую спектральную мощность абсолютно черного тела [5]. Спектральная

мощность теплового излучения черного тела в единице спектра длин волн описывается обобщенной формулой Планка:

$$I_{\lambda} = \alpha C_1 / \{ \lambda^5 [\exp(C/(\lambda T)) - 1] \};$$

$$k = 1/\lambda;$$

$$\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \alpha(\lambda, T);$$

$$\alpha \approx \alpha_b, \quad (1)$$

где I_{λ} – удельная спектральная мощность по длинам волн ($\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{см}^{-2}$); $C_1 = 37417,7 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 / \text{см}^2$; $C = C_2 = 14387,8 \text{ мкм} \cdot \text{К}$; T – температура; λ – длина волны; k – волновое число; ε – коэффициент черноты излучения; α – коэффициент передачи (пропускания); α – коэффициент преобразования («радиоматический» коэффициент) для регистрируемого излучения, определяемый произведением коэффициента излучения наблюдаемого объекта и коэффициента передачи (пропускания) измеряемого электромагнитного излучения через среду наблюдения. α_b – ниже изложенное модельное приближенное значение коэффициента α .

Измерение приближенной «радиометрической» температуры допускает использование некоторого модельного значения α_b для неизвестного «радиоматического» коэффициента α .

Преобразуем уравнение (1) к следующей формуле для измеряемой температуры:

$$T = C(1/\lambda - 1/\lambda_0) / \{ \ln[C_1 \alpha(\lambda, T) / (\lambda^5 I_{\lambda}(\lambda)) + 1] - \ln[C_1 \alpha(\lambda_0, T) / (\lambda_0^5 I_{\lambda}(\lambda_0)) + 1] \}; \quad (2)$$

$$T = C / \{ \lambda \cdot \ln [C_1 \varepsilon(\lambda, T) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) + 1] \},$$

где λ_0 – некоторая отсчетная длина волны для спектрального диапазона.

Здесь вторая формула есть частный случай для первого выражения, если выполняется приближение большой отсчетной длины волны в сравнении с используемыми $\lambda_0 \gg \lambda$; $k_0 \ll k$.

Измерение температур по тепловым излучениям наблюдаемого объекта с использованием фотоприемников на основе из кремния или арсенида индия обычно проводят в диапазонах инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения на длинах волн $\lambda \approx 0,2-2,5$ мкм ($k \approx 0,4-5$ мкм⁻¹), которые соответствует области фоточувствительности кремния или арсенида индия. Максимум спектральной мощности I_λ находится на длине волны равной $2899,9 \lambda \cdot K/T$, где T – температура объекта. Наиболее значительные изменения спектральной мощности теплового излучения происходят в коротковолновой области спектра.

2. Коэффициент излучения

Спектры теплового излучения реальных объектов отличаются от спектра черного тела, эти отличия описываются дополнительным коэффициентом излучения $0 \leq \varepsilon(\lambda, T) \leq 1$, являющимся, в общем случае, функцией зависящей от длины волны и температуры и называемым коэффициентом черноты излучения (излучательной способностью или коэффициентом черноты). Коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ измеряют экспериментально, и при этом в общем случае для измерения коэффициента излучательной способности требуется дополнительный метод измерения. Экспериментальные данные по коэффициентам излучательной способности разных материалов содержатся в справочнике [2].

Если предположить единичность «радиоматического» (radiomatical) коэффициента для регистрируемого излучения ($\varepsilon = 1$), то вместо формулы (2) для измеряемой температуры получим цветовой и яркостной аналог для регистрируемой температуры.

Преобразуем уравнение (2) к следующему определению цветовой температуры:

$$T_c = C(1/\lambda - 1/\lambda_0) / \{ \ln [C_1 / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) + 1] - \ln [C_1 / (\lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0)) + 1] \}. \quad (3)$$

где T_c – цветовая температура.

Решение (3) преобразуем к следующему определению для яркостной температуры:

$$T_r = C / \{ \lambda \cdot \ln [C_1 / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) + 1] \}, \quad (4)$$

где T_r – яркостная температура.

В простой оптической пирометрии измерения интенсивности излучения проводят обычно на одной (4) или двух (3) эффективных длинах волн [5–7], соответствующих некоторым участкам спектра, используемых в пирометрах частичного излучения. В пирометрах полного излучения измеряется «излучательная» температура.

3. Вычисление температуры

Рассмотрим исходную формулу (1) в преобразованных координатах (B, λ).

$$B = \lambda P / C; \quad P = \ln [1 + (\varepsilon C_1) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda))], \quad (5)$$

где $B = 1/T$ – значение обратной величины действительной температуры.

Также рассмотрим полученную формулу (5) в преобразованных координатах (B, λ) в коротковолновом приближении (коротковолновой асимптотике).

$$B = \lambda P / C; \quad (6)$$

$$P = \ln \{ (\varepsilon C_1) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) \} -$$

$$- \sum_j (-1)^j \{ (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) / (\varepsilon C_1) \}^j / j;$$

$$1 \leq j \leq \infty;$$

$$(\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) / (\varepsilon C_1) \ll 1,$$

где \sum_j – знак суммирования по натуральным числам.

Если провести измерения интенсивности на многих длинах волн и задать решение для многих температур для каждой длины волны λ_1, λ_2 и так далее, то результирующая средняя величина по спектру для обратных температур есть интегральное решение для величины действительной обратной температуры. Значение функции $B(\lambda)$ в указанных координатах является постоянной величиной, не зависящей от длины волны.

Эта постоянная равна обратной величине температуры. В реальных измерениях график этой функции регистрируется с дополнительными систематическими и статистическими погрешностями и неопределенностями. Для вычисления среднего значения измеряемой температуры используется метод наименьших квадратов [3] или метод усреднения.

4. Метод измерения температуры

Для калибровки пирометров необходимо откалибровать спектральные радиометры и фотометры, которые используются для измерения спектральной мощности.

Эта калибровка относится к аппаратному и программному обеспечению спектрометров для обеспечения требуемой зависимости выходного сигнала от интенсивности регистрируемого излучения.

Для калибровки спектральных пирометров можно использовать термостат с те-

пловым электромагнитным излучателем с применением эквивалента абсолютно черного тела (АЧТ). Способ предполагает сравнение показаний поверяемого измерительного прибора с образцовым.

Перепишем уравнение (2) в ином представлении от обратной температуры.

$$B = \{ \ln [C_1 \alpha(\lambda, B) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda)) + 1] - \ln [C_1 \alpha(\lambda_0, B) / (\lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0)) + 1] \} / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \};$$

$$B = 1/T. \tag{7}$$

С целью перехода к коротковолновому приближению преобразуем выражение (7) к следующему уравнению.

$$B = B_s + \{ \ln [1 + \lambda^5 I_\lambda(\lambda) / (C_1 \alpha(\lambda, B))] - \ln [1 + \lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0) / (C_1 \alpha(\lambda_0, B))] \} / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \};$$

$$B_s = \{ \ln [\lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0) / \lambda^5 I_\lambda(\lambda)] + \ln [\alpha(\lambda, B) / \alpha(\lambda_0, B)] \} / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \}; B = 1/T, \tag{8}$$

где B_s – значение обратной величины некоторой температуры, которая равна действительной обратной температуре в коротковолновом приближении.

Рассмотрим простейшую коротковолновую асимптотику в соответствии с формулой (6) для вычислений температуры.

$$B = (P - P_0) / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \};$$

$$P = \ln \{ (\alpha C_1) / (\lambda^5 I_\lambda) \};$$

$$B = B_d + [\ln \alpha_{\lambda}] / [C(1/\lambda - 1/\lambda_0)];$$

$$\alpha_{\lambda} = \alpha(\lambda, B) / \alpha(\lambda_0, B); \tag{9}$$

$$B_d = \{ \ln [(\lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0)) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda))] \} / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \},$$

где B_d – значение обратной величины простой «радиометрической» температуры; α_{λ} – коэффициент спектрального отношения для радиоматического коэффициента; $|\ln [\alpha_{\lambda}(B)] / [C(1/\lambda - 1/\lambda_0)]|$ – модуль неопределенности логарифма радиоматического коэффициента нормированного на ширину спектра волновых чисел.

Здесь предполагается усреднение по спектру для простой «радиометрической» обратной температуры и для действительной обратной температуры.

В модельном приближении формула (9) приводит к упрощенному вычислению «радиометрической» обратной температуры с усреднением по спектру длин волн.

$$B = (P - P_0) / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \};$$

$$P = \ln \{ (\alpha C_1) / (\lambda^5 I_\lambda) \};$$

$$B = B_b + [\ln \alpha_{\lambda b}] / [C(1/\lambda - 1/\lambda_0)];$$

$$\alpha_{\lambda b} = \alpha_b(\lambda, B) / \alpha_b(\lambda_0, B); \tag{10}$$

$$B_b = \{ \ln [(\lambda_0^5 I_\lambda(\lambda_0)) / (\lambda^5 I_\lambda(\lambda))] \} / \{ C(1/\lambda - 1/\lambda_0) \};$$

$$|\ln [\alpha_{\lambda}(B) / \alpha_{\lambda b}(B)] / [C(1/\lambda - 1/\lambda_0)]| \ll B,$$

где B_b – значение обратной величины «модельной радиометрической» температуры; $|\ln [\alpha_{\lambda}(B) / \alpha_{\lambda b}(B)] / [C(1/\lambda - 1/\lambda_0)]|$ – модуль неопределенности логарифма коэффициента спектрального отношения нормированного на ширину спектра волновых чисел.

Неопределенность коэффициента спектрального отношения уменьшается при использовании усиления коэффициента излучения [7]. Дополнительно при использовании более широкой области волновых чисел регистрируемого спектра, неопределенность коэффициента спектрального отношения приводит к меньшей относительной неопределенности обратной температуры [4], и в пределе получаем действительное значение обратной температуры [3].

Результатирующая формула вычислений (10), соответствующая модельному представлению, позволяет вычислять температуру с некоторой точностью и относительной погрешностью, определяемой выбором параметров модели.

Рассмотрим вопрос о методе измерения температуры с использованием некоторого дополнительного образцового термометра. Допустим, что определение действительной температуры может быть проведено в два этапа: вначале калибровочное измерение контрольной температуры контактным или альтернативным способом (например, бесконтактным аналогом контактного) в некоторой контрольной точке, а затем бесконтактное измерение термическим пирометром

разности радиометрической и контрольной температур в области визирования. В соответствии с решением (9) должна использоваться следующая формула.

$$B = (B_p - B_n) + B_m + \ln[\alpha_x(B)/\alpha_x(B_m)]/[C(1/\lambda - 1/\lambda_0)], \quad (11)$$

где B – действительное значение обратной температуры; B_p – измеренное значение обратной величины температуры; B_n – измеренное контрольное значение обратной величины температуры; B_m – калибровочное контрольное значение обратной величины температуры; $\alpha_x(B)/\alpha_x(B_m)$ – коэффициент термического отношения коэффициентов спектрального отношения. Здесь предполагается некоторое усреднение по спектру и по выборке значений контрольных температур с некоторыми весовыми коэффици-

$$B = (B_p - B_n) + B_m + \ln[\alpha_{ab}(B)/\alpha_{ab}(B_m)]/[C(1/\lambda - 1/\lambda_0)];$$

$$\ln[\{\alpha_x(B)/\alpha_x(B_m)\}/\{\alpha_{ab}(B)/\alpha_{ab}(B_m)\}]/[C(1/\lambda - 1/\lambda_0)] \ll B. \quad (12)$$

Здесь возможно проведение в модельном приближении (10) измерений радиометрических обратных температур, усредняемых по спектру и выборке температур.

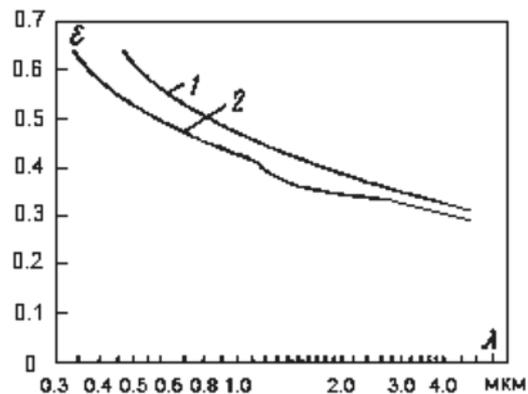
Результирующая относительная погрешность измерений действительной температуры может уменьшиться при использовании дополнительной штатной калибровки (12). Следовательно, в общем случае результирующее штатное измерение с калибровкой (12) соответствует псевдомодельной «коллекционной» радиометрической температуре, где для вычисления температуры посредством калибровки учтена некоторая относительная неопределенность радиометрического коэффициента в формуле (9).

Для примера рассмотрим оценку неравенства в последней формуле в (12) для двух способов (модель $\{\alpha_{ab}(B)/\alpha_{ab}(B_m) = 1\}$ «единичная» или $\{\alpha_x(B)/\alpha_x(B_m) \neq 1\}$ справочная, измеренная [2]) при температурах 1400 К и 2000 К при нагревании циркония и измерении спектра светового излучения по нормали к поверхности образца в диапазоне длин волн 500–1000 нм. Вычисления произведем при отсчетной длине волны равной 750 нм. Данный выбор обусловлен справочными данными для коэффициента излучения циркония, представленными в [2] и изображенными на рисунке.

циентами. Действительное значение температуры определяется интерполяцией по выборке контрольных температур.

Такой метод измерения температур называется произведенным в операциях, которые происходят с предварительным или дополнительным регистрированием состояния системы.

Допустим, что коэффициент термического отношения, входящий в определение температуры (11), близок к модельной величине, или измерен достаточно широкий интервал волновых чисел. Тогда различие между реальным и модельным значением последнего слагаемого в (11) близко к нулю в сравнении с обратной температурой и получаем следующую упрощенную формулу.



Коэффициент излучения по нормали с поверхности циркония для двух температур [2]:
1 – 1400 К и 2 – 2000 К

Для упрощения задачи предположим, что поглощение света в оптическом тракте измерения равно нулю. Кроме того предположим, что статистическая погрешность измерений близка к нулю. Также предположим, что тракт измерения света имеет требуемую аппаратную зависимость выходного сигнала от интенсивности света.

После расчетов неравенства в последней формуле в (12) получаем величину различия между справочным и модельным значениями «радиометрической» об-

ратной температуры $\approx 1/1400 \text{ K}^{-1}$. Это неравенство выполнено и усреднено равно $\approx 1/3700000 \text{ K}^{-1} \ll 1/1400 \text{ K}^{-1}$, что является приемлемым для «коллекционного» пирометрического метода в данном примере.

Вывод

В радиометрической термометрии возможно измерение температуры с использованием коэффициентов термического отношения. Для меняющихся «радиоматрических» коэффициентов результат вычислений, соответствует приближенной «радиометрической» температуре.

Список литературы

1. Дубас Л.Г. Термопирометрия для измерения действительной температуры. // Бесконтактная термопирометрия

для плотного вещества. – URL: <http://econf.rae.ru/article/6558> (дата обращения 14.02.2012) – 6 с.

2. Латыев Л.Н., и др. Излучательные свойства твердых материалов; под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.

3. Daniel L.P.Ng. Многоволновой пирометр для серых и не серых поверхностей в присутствии мешающего излучения. Патент США № 5 326 172 МПК : G01J5/00; G01J5/52; G01J5/62.

4. Felice R.A. Expert System Spectropyrometer Results for non-black, non-grey, or Changing Emissivity and Selectively Absorbing Environments. Electro-Techno- Exposition. – М., 2003. – Nov. 2–4, – 11 p.

5. Quinn T.J. Temperature // London: Academic Press Ltd., 1983. – P. 384. (Куинн Т. Температура. – М.: Мир, 1985. – 448 с.)

6. Radiometric temperature measurements. I. Fundamentals. Z.M.Zhang, etc., Eds. / Experimental Methods in the Physical Sciences. – Vol. 42. Amsterdam: Elsevier, 2009.

7. Radiometric temperature measurements. II. Applications. Z.M. Zhang, etc., Eds. / Experimental Methods in the Physical Sciences. – Vol. 43. Amsterdam: Elsevier, 2010.