

В. М. ТЫМКУЛ, Д. С. ШЕЛКОВОЙ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ НЕОДНОРОДНОГО ФОНА

Предлагается методика и приводятся результаты расчета температурной чувствительности пирометра, при работе которого учитывается влияние в качестве помехи неоднородного поля излучения фона, отраженного от поверхности исследуемых объектов. Результаты расчета температурной чувствительности пирометра приведены в функции значений неоднородности температуры окружающей среды (фона).

Ключевые слова: пирометр, температурная чувствительность, энергетическая светимость, фоновое излучение.

В работах [1, 2] приведены математическая модель и методика расчета температурной чувствительности пирометра, учитывающая собственное излучение объектов и влияние отраженного излучения окружающего фона и излучения оптических элементов схемы как однородных помех. Температурная чувствительность описывается следующим выражением:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \mu K_{\text{эт}} (1 + U_o / U_{\text{п.э}} + U_{\text{фон}} / U_{\text{п.э}}) \sqrt{ab \Delta f}}{A \omega D^* B}; \quad (1)$$

$$B = c_2 \left[\frac{1}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \varepsilon(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T) d\lambda + \frac{1}{T_{\text{фон}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T_{\text{фон}}) d\lambda \right],$$

где μ — отношение сигнал/шум; $K_{\text{эт}}$ — коэффициент использования приемником излучения эталонного источника; $U_{\text{п.э}}$ — сигнал помехи, эквивалентный электрическому шуму; U_o и $U_{\text{фон}}$ — интегральные сигналы, обусловленные внутренней оптической и внешней фоновой помехами; a, b — линейные размеры чувствительной площадки приемника излучения; Δf — полоса частот электрической схемы включения приемника излучения; A — площадь входного зрачка объектива пирометра; ω — телесный угол поля зрения объектива; D^* — удельная „обнаружительная“ способность приемника излучения; c_2 — вторая постоянная формулы Планка; T — термодинамическая (абсолютная) температура поверхности объекта; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемника излучения; $\tau_{\text{об}}(\lambda)$, $\tau_a(\lambda)$, $\tau_{\text{ф}}(\lambda)$ — спектральные коэффициенты пропускания соответственно объектива, слоя атмосферы и спектрального фильтра; $\varepsilon(\lambda)$ — спектральный коэффициент теплового излучения поверхности объекта; λ — длина волны; λ_1, λ_2 — длины волн, соответствующие границам чувствительности приемника излучения; $M_e(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ); $T_{\text{фон}}$ — абсолютная температура окружающей среды (фона); $\rho(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения поверхности исследуемого объекта; $M_e(\lambda, T_{\text{фон}})$ — спектральная плотность энергетической светимости фона.

В случае когда поле температур излучения фона неоднородно, в формуле (1) под величиной $U_{\text{фон}}$ следует понимать среднеквадратическое значение сигнала помехи $\overline{\Delta U_{\text{фон}}}$, а величины $T_{\text{фон}}$ и $M_e(\lambda, T_{\text{фон}})$ будут иметь смысл математического ожидания соответственно поля температур $\overline{T_{\text{фон}}}$ и функции Планка для светимости АЧТ с температурой $\overline{T_{\text{фон}}}$.

Рассмотрим методику расчета температурной чувствительности пирометра истинной температуры с учетом влияния неоднородности фонового теплового излучения [3].

Допустим, что функция распределения поля температур излучения фона есть некоторая функция $P(T_{\text{фон}})$. Тогда для математического ожидания поля температур $\overline{T_{\text{фон}}}$ и его дисперсии σ^2 справедливы следующие соотношения:

$$\overline{T_{\text{фон}}} = \int_{T_{\text{фон}1}}^{T_{\text{фон}2}} T_{\text{фон}} P(T_{\text{фон}}) dT_{\text{фон}}; \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \overline{(T_{\text{фон}} - \overline{T_{\text{фон}}})^2} = \int_{T_{\text{фон}1}}^{T_{\text{фон}2}} (T_{\text{фон}} - \overline{T_{\text{фон}}})^2 P(T_{\text{фон}}) dT_{\text{фон}}, \quad (3)$$

$$\overline{\Delta T_{\text{фон}}} = \sigma.$$

В свою очередь, среднеквадратическое значение сигнала помехи $\overline{\Delta U_{\text{фон}}}$ представим как

$$\overline{\Delta U_{\text{фон}}} = U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}}) + \overline{\delta U_{\text{фон}}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}})$ и $\overline{\delta U_{\text{фон}}}$ — постоянная и переменная составляющие сигнала помехи соответственно, равные:

$$U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}}) = \frac{U_{\text{п.э}} A \omega D^*}{K_{\text{эт}} \pi \sqrt{ab \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) d\lambda, \quad (5)$$

$$\overline{\delta U_{\text{фон}}} = \frac{U_{\text{п.э}} A \omega D^*}{K_{\text{эт}} \pi \sqrt{ab \Delta f}} \left(\frac{c_2 \overline{\Delta T_{\text{фон}}}}{\overline{T_{\text{фон}}}^2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) d\lambda. \quad (6)$$

В результате, по аналогии с формулой (1), выражение для температурной чувствительности пирометра истинной температуры при наличии неоднородности поля температур излучения фона приобретает следующий вид:

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(н)} = \frac{\pi \mu K_{\text{эт}} (1 + U_{\text{o}}/U_{\text{п.э}} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}}/U_{\text{п.э}}) \sqrt{ab \Delta f}}{A \omega D^* B}; \quad (7)$$

$$B = c_2 \left[\frac{1}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \varepsilon(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T) d\lambda + \frac{1}{\overline{T_{\text{фон}}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) d\lambda \right].$$

В общем случае методика расчета температурной чувствительности пирометров при наличии неоднородного поля теплового излучения фона согласно предлагаемой математической модели [4] содержит следующие этапы.

1. Задаются диапазон изменения температур $\Delta T_{\text{фон}} = T_{\text{фон}_2} - T_{\text{фон}_1}$ и функция распределения $P(T_{\text{фон}})$.

2. По формуле (2) с учетом конкретной функции $P(T_{\text{фон}})$ вычисляется математическое ожидание поля температур $\overline{T_{\text{фон}}}$.

3. По формуле (3) вычисляется дисперсия σ^2 значений температуры $T_{\text{фон}}$.

4. Полученное значение $\overline{T_{\text{фон}}}$ подставляется в выражение для светимости фона со спектральным коэффициентом теплового излучения $\varepsilon_{\text{фон}}(\lambda)$:

$$M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) = \varepsilon_{\text{фон}}(\lambda) c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda \overline{T_{\text{фон}}}} - 1}.$$

5. По формулам (5) и (6) вычисляются значения сигналов $U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}})$ и $\overline{\delta U_{\text{фон}}}$.

6. По формуле (4) определяется среднеквадратическое значение сигнала помехи $\Delta U_{\text{фон}}$.

7. По формуле (7) с учетом данных, приведенных в работах [1, 2], и данных, полученных в пп. 1—6, определяется значение $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$.

Для оценки влияния неоднородности поля теплового излучения окружающего фона на значение температурной чувствительности пирометра истинной температуры [3] рассмотрим следующее приближение.

Представим значение $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$ формулой

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(H)} = \Delta T_{\text{пор}} \left(\frac{1 + U_o/U_{\text{п.э}} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}}/U_{\text{п.э}}}{1 + U_o/U_{\text{п.э}} + U_{\text{фон}}/U_{\text{п.э}}} \right). \quad (8)$$

С учетом формулы (4) выражение (8) запишем в следующем виде:

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(H)} = \Delta T_{\text{пор}} \left[\frac{1 + U_o/U_{\text{п.э}} + (U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}})/U_{\text{п.э}} + \overline{\delta U_{\text{фон}}}/U_{\text{п.э}})}{1 + U_o/U_{\text{п.э}} + U_{\text{фон}}/U_{\text{п.э}}} \right]. \quad (9)$$

Допустим, что справедливы соотношения

$$U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}}) \approx U_{\text{фон}}; \quad \overline{\Delta U_{\text{фон}}}/U_{\text{п.э}} \gg (1 + U_o/U_{\text{п.э}}), \quad U_{\text{фон}}/U_{\text{п.э}} \gg (1 + U_o/U_{\text{п.э}}).$$

Тогда, пренебрегая в формулах (8) и (9) выражением $(1 + U_o/U_{\text{п.э}})$, соотношение (9) запишем в виде

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(H)} = \Delta T_{\text{пор}} \left[1 + \frac{\overline{\delta U_{\text{фон}}}}{U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}})} \right] \quad (10)$$

и обозначим выражение в квадратных скобках следующим образом:

$$F(\overline{\Delta T_{\text{фон}}}, \overline{T_{\text{фон}}}) = 1 + \frac{\overline{\delta U_{\text{фон}}}}{U_{\text{фон}}(\overline{T_{\text{фон}}})}. \quad (11)$$

Тогда на основе выражений (5), (6) и (11) можно отметить, что функция $F(\overline{\Delta T_{\text{фон}}}, \overline{T_{\text{фон}}})$ физически характеризует влияние параметров неоднородности поля температур излучения фона на значение температурной чувствительности пирометра.

Применительно к схеме пирометра истинной температуры с использованием параметров оптической схемы и приемника излучения [1, 2] с помощью программы MathCad был произведен расчет функции $F(\overline{\Delta T_{\text{фон}}}, \overline{T_{\text{фон}}})$ в зависимости от параметра $\overline{\Delta T_{\text{фон}}}$. Результаты расчета графически представлены на рис. 1. На рис. 2 приведены полученные ранее графики зависимости температурной чувствительности $\Delta T_{\text{пор}}$ пирометра от температуры объекта T при различных значениях $T_{\text{фон}}$ и T_o (T_o — температура оптических элементов схемы) [1].

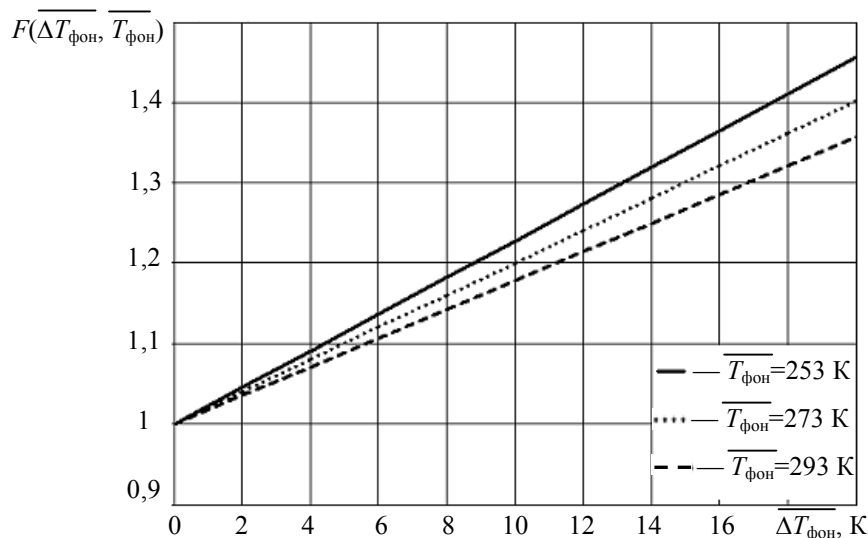


Рис. 1

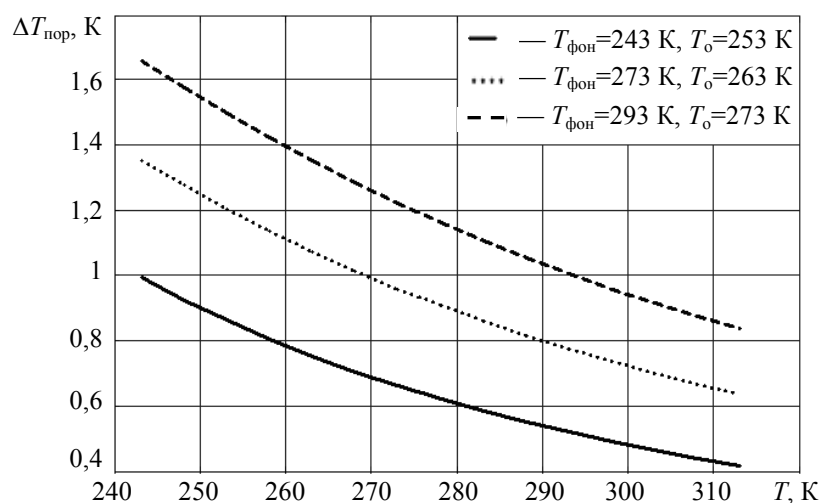


Рис. 2

На основе полученных результатов (см. рис. 1, 2) и соотношений (10), (11) были определены значения температурной чувствительности пирометра истинной температуры $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$ при воздействии неоднородного поля теплового излучения окружающего фона.

Анализ изложенной методики и результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- при воздействии неоднородного поля теплового излучения фона как помехи на работу пирометра его температурная чувствительность ухудшается;
- физически природа снижения чувствительности пирометра объясняется двумя факторами: первый фактор заключается в „засветке“ приемника излучения пирометра постоянной

составляющей фонового излучения, второй фактор связан с увеличением сигнала, обусловленного помехой за счет переменной составляющей излучения фона;

— температурная чувствительность пирометра при воздействии неоднородного поля теплового излучения фона уменьшается в 1,4 раза при увеличении значений $\overline{\Delta T_{\text{фон}}}$ до 20 К; средние значения $\overline{T_{\text{фон}}}$ при этом составляют от 253 до 293 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тымкул В. М., Шелковой Д. С., Лебедев Н. С. К расчету температурной чувствительности пирометра с учетом собственного излучения объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 12. С. 48—52.
2. Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Шелковой Д. С., Лебедев Н. С. Математическая модель температурной чувствительности пирометра истинной температуры // Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: Сб. материалов Междунар. науч. конгресса „ГЕО — Сибирь — 2006“, 24—28 апр. 2006 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 4. С. 148.
3. Пат. 2219504 РФ, МКИ G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры / В. М. Тымкул, Н. С. Лебедев, Д. С. Шелковой, С. А. Воронин. № 2002104325/28; опубл. 20.12.2003; Бюл. № 35.
4. Тымкул В. М., Шелковой Д. С., Слюсарев Д. С. Математическая модель чувствительности пирометра при воздействии помех неоднородного фона // Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: Сб. материалов Междунар. науч. конгресса „ГЕО — Сибирь — 2006“, 25—27 апр. 2007 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 2. С. 6.

Сведения об авторах

- Василий Михайлович Тымкул** — канд. техн. наук; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптико-электронных приборов, Новосибирск; профессор; E-mail: oep@ssga.ru
- Денис Сергеевич Шелковой** — НПО „Сибирский арсенал“, Новосибирск; нач. испытательной лаборатории; E-mail: shelden@ngs.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов СГГА

Поступила в редакцию
01.10.07 г.