

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

А.Б. Ионов, Б.П. Ионов, Е.В. Румянцева, А.И. Мирная

В работе рассматривается вопрос разработки алгоритма определения температуры объекта по зарегистрированной спектральной характеристике его теплового излучения, основанного на идее аппроксимации с использованием закона Планка. Предложен критерий сравнения эталонного и измеренного спектров. Результаты моделирования показали эффективность применения алгоритма для проведения пирометрических исследований в априори неизвестных условиях (к примеру, при существенном поглощении излучения атмосферой).

**Ключевые слова:** температура, пирометр, спектр, инфракрасное излучение, тепловой контроль.

### Введение

Использование концепции спектральной пирометрии [1,2] является на текущий момент одним из наиболее перспективных путей повышения достоверности результатов бесконтактных тепловых измерений, проводимых в тяжелых производственных условиях (т.е. существенно отличающихся от нормальных). На рисунке 1 показана характерная для пирометрических исследований радиометрическая цепочка, описывающая последовательность явлений, происходящих с момента испускания электромагнитного излучения (как правило, интерес представляет инфракрасный диапазон) объектом до его поглощения чувствительным элементом измерительного прибора. Основная проблема пирометрии заключается в неустранимом искажении полезного сигнала от объекта элементами радиометрической цепочки, характеристики пропускания которых с течением времени подвержены случайным для оператора изменениям.

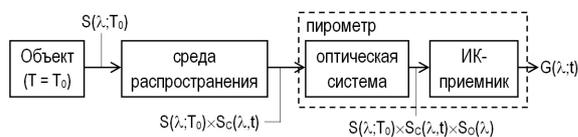


Рисунок 1 – Радиометрическая цепочка

Кривая 1 на рисунке 2 представляет собой описываемый законом Планка [3] идеальный спектр ИК-излучения объекта (абсолютно черного тела), нагретого до 700°C. Кривая 2 рисунка 2 демонстрирует спектр данного излучения, прошедшего через все элементы радиометрической цепочки и зарегистрированного приемником. Возникшие искажения в конкретных условиях связаны, в основном, с отличным коэффициентом излучения объекта от единицы, а также с присутствием в атмосфере (среде распространения)

достаточного количества поглощающих компонент – паров воды и углекислого газа [4]. При этом, любое дополнительное отклонение условий измерения от текущих будет приводить к изменению формы вносимых искажений.

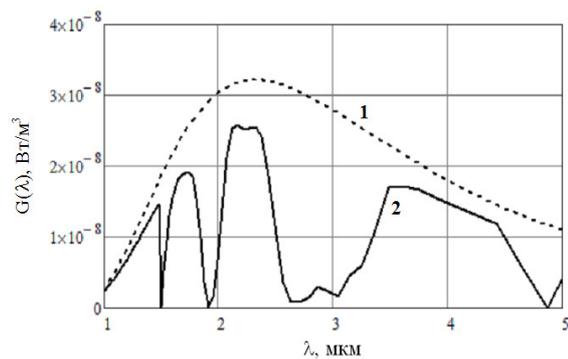


Рисунок 2 – Спектральные характеристики ИК-излучения объекта с температурой 700°C (кривая 1 – идеальная, кривая 2 – искаженная)

Основная идея спектральной пирометрии заключается в предварительной регистрации формы спектральной характеристики излучения объекта [5] с последующим извлечением из нее полезной информации о температуре. В отличие от широко распространенных интегральных методов, реализуемых в пирометрах частичного излучения, подобный подход позволяет получить гораздо больше полезных сведений, необходимых для проведения статистической обработки с целью повышения достоверности результатов.

Таким образом, первостепенное значение приобретает задача разработки оптимального алгоритма определения температуры объекта по зарегистрированному спектру его теплового излучения, позволяющего по-

лучать приемлемый результат в широких условиях измерения.

**Разработка критерия сравнения спектральных характеристик**

Центральная идея разрабатываемого алгоритма заключается в аппроксимации измеренной спектральной характеристики  $G(\lambda)$  эталонной функцией  $S(\lambda; T)$ , одним из параметров которой является температура объекта. В таком случае, искомой оценкой температуры будет аргумент  $T = T_s$  функции  $S(\lambda; T)$ , при котором опеспечивается наилучшее совпадение спектральных характеристик  $G(\lambda)$  и  $S(\lambda; T)$ . В качестве доступной априорной информации при определении эталонной функции для конкретных условий выступает закон Планка, а также имеющиеся сведения о статических спектральных характеристиках элементов радиометрической цепочки: излучения объекта, пропускания атмосферы и оптической системы пирометра, поглощения приемника излучения. При отсутствии какой-либо дополнительной достоверной априорной информации эталонная функция сводится к закону Планка.

Таким образом, первоочередную важность принимает вопрос об оптимальном критерии сравнения измеренного и эталонного спектров. Вследствие особенностей преобразования спектральной характеристики излучения объекта в радиометрической цепочке (в подавляющем большинстве случаев имеет место ее искажение в сторону уменьшения) относительно простые математические алгоритмы аппроксимации (метод наименьших квадратов и пр.) в данном случае неприемлемы.

На рисунке 3 показана упрощенная модель радиометрической цепочки, демонстрирующая последовательность преобразования энергии излучения объекта на некоторой длине волны  $\lambda = \lambda_m$ . Данная модель включает в себя: источник сигнала (ИС), подчиняющегося (для соответствующей длины волны и температуры объекта) эталонной функции  $S(\lambda_m; T_0)$ ; управляемые ключи (K1 и K2), учитывающие возможность наличия полосы поглощения и случайного выброса «вверх»; а также генератор случайного сигнала (ГСС) с нулевым математическим ожиданием и плотностью вероятности  $W_\sigma(x; \lambda_m)$ , описывающий флуктуационные

шумы приемника излучения. За исключением  $S(\lambda; T)$  и  $G(\lambda)$  все характеристики и параметры схемы являются априори неизвестными, а основную неопределенность в результате измерения вносит отсутствие точной информации о значениях характеристик  $n_1(\lambda)$  и  $k_1(\lambda)$ , «ответственных» за поглощение. Тем не менее, поскольку в большинстве случаев полосы поглощения присутствуют только на отдельных (но не всегда известных) спектральных интервалах, то оставшиеся участки могут быть с успехом использованы для «расшифровки» [3].

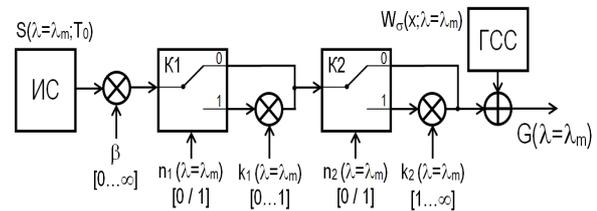


Рисунок 3 – Упрощенная модель радиометрической цепочки

При решении задачи аппроксимации требуется определить степень соответствия измеренной величины  $G(\lambda_m)$  значению эталонной функции  $S(\lambda_m; T)$ . Как следует из схемы на рисунке 3, в качестве дополнительного параметра опорной функции может выступать интегральный масштабный коэффициент  $\beta$  так, что

$$S_\beta(\lambda; T, \beta) = \beta \cdot S(\lambda; T).$$

Искомая степень соответствия может быть количественно выражена функцией правдоподобия  $\Pi(\lambda; T, \beta)$ , которая для случая  $G(\lambda_m) \leq S_\beta(\lambda_m; T, \beta)$  равна

$$\Pi(\lambda_m; T, \beta) = P_1 + (1 - P_1) \cdot L(\lambda_m, T, \beta),$$

где  $P_1$  – априорная вероятность присутствия линии поглощения на заданной длине волны;

$$L(\lambda_m, T, \beta) = \frac{W_\sigma(S_\beta(\lambda_m; T, \beta) - G(\lambda_m))}{W_\sigma(0)}.$$

Для случая  $G(\lambda_m) > S_\beta(\lambda_m; T, \beta)$

$$\Pi(\lambda_m; T, \beta) = P_2 + (1 - P_2) \cdot L(\lambda_m, T, \beta),$$

где  $P_2$  – априорная вероятность присутствия случайного выброса «вверх» на заданной длине волны.

## РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

### Алгоритм оценки температуры

- Сбор информации о статических спектральных характеристиках элементов радиометрической цепочки: излучения объекта, пропускания оптической системы пирометра, поглощения датчика. Осуществление корректировки эталонной функции  $S(\lambda; T)$  на основе полученных данных.
- Априорный выбор параметров  $P_1$ ,  $P_2$  и характеристики  $W_\sigma(x)$ .
- Измерение спектральной характеристики излучения объекта  $G(\lambda)$  в интервале длин волн от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$ .
- Вычисление функции правдоподобия  $\Pi(\lambda; T, \beta)$  для каждой комбинации допустимых значений длины волны, температуры и масштабного коэффициента.
- Определение интегральной функции правдоподобия

$$\Pi_\Sigma(T, \beta) = \sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \ln(\Pi(\lambda; T, \beta)).$$

- Искомая оценка температуры объекта равна

$$T_S = \arg \max_T [\Pi_\Sigma(T, \beta)].$$

- Метрологические характеристики полученной оценки температуры могут быть оценены из анализа интегральной функции правдоподобия.

### Исследование алгоритма на тестовых данных

Для экспериментальной проверки разработанного алгоритма рассмотрим случай анализа спектральной характеристики излучения объекта, изображенной кривой 2 на рисунке 1. Дополнительные исходные данные: априорные вероятности  $P_1$  и  $P_2$  равны, соответственно, 0,1 и 0,005 на всех длинах волн; характеристика  $W_\sigma(x)$  аппроксимирована плотностью вероятности нормального центрированного случайного процесса.

На рисунке 4 показаны зависимости вычисленных значений функции правдоподобия  $\Pi(\lambda; T, \beta)$  от длины волны при оптимальных масштабных коэффициентах: кривая 1 соответствует температуре объекта 700°C, кривая 2 – температуре 650°C. Хорошо заметно, что в диапазонах 1,85-2,05 мкм и 2,45-

3,35 мкм алгоритмом принято решение о наличии линий поглощения, вследствие чего информация, содержащаяся в данных спектральных интервалах, фактически не влияет на итоговый результат.

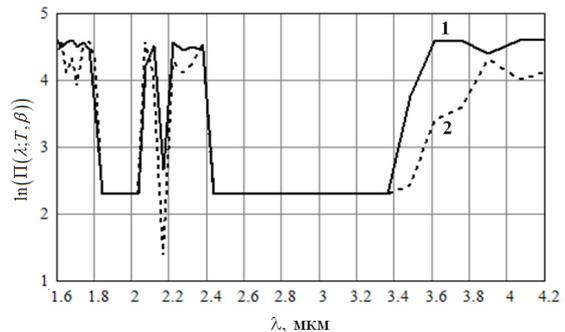


Рисунок 4 – Зависимости значений функции правдоподобия от длины волны (кривая 1 – для температуры 700°C, кривая 2 – для температуры 650°C)

Интегральная функция правдоподобия, соответствующая рассматриваемому случаю и приведенная к одному аргументу (температуре), представлена на рисунке 5. Как следует из ее анализа, погрешность оценки температуры не превышает 15°C (или 2,2%), что является хорошим результатом. При этом значение данной функции для истинной температуры, равной 700°C, практически соответствует максимальному.

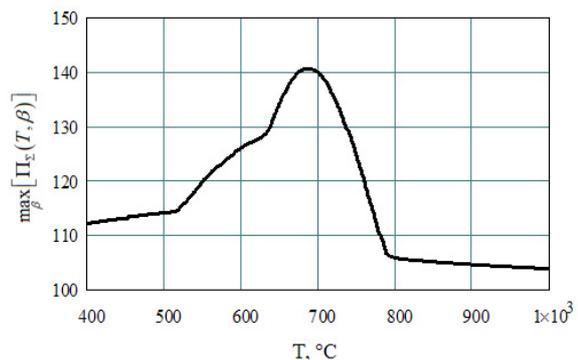


Рисунок 5 – Интегральная функция правдоподобия

На рисунке 6 приведен график относительной погрешности оценки температуры (в условиях наличия в атмосфере достаточного количества водяного пара) при использовании предложенного алгоритма спектральной пирометрии (кривая 2) и, для сравнения, принципа широко распространенного пирометра частичного излучения [2] (кривая 1), работающего в диапазоне 1,5-4,5 мкм. График 1 данного рисунка демонстрирует суще-

ственную зависимость показаний используемых в настоящее время моделей пирометров от условий измерения (в данном случае – эффекта паразитного селективного поглощения излучения средой распространения).

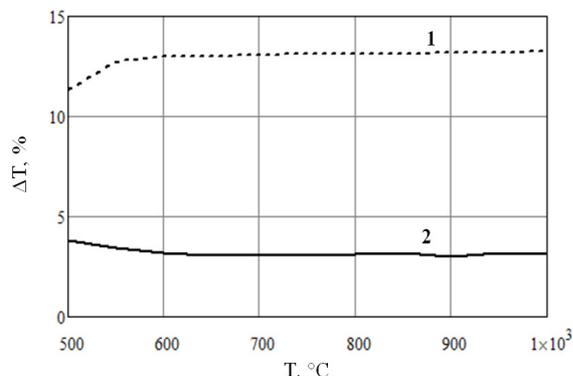


Рисунок 6 – Относительная погрешность оценки температуры (кривая 1 – пирометр частичного излучения, кривая 2 – предложенный алгоритм спектральной пирометрии)

### Выводы

Разработанный алгоритм спектральной пирометрии предназначен для повышения достоверности бесконтактных температурных измерений в априори неизвестных условиях.

#### Достоинства алгоритма:

- получение качественной оценки температуры в условиях существенного искажения отдельных, заранее не известных, участков спектра (как правило – за счет поглощения газами, входящими в состав среды распространения);
- абсолютная инвариантность результата к изменению интегрального коэффициента излучения объекта, интегрального коэффициента пропускания атмосферы и т.п.;
- широкие возможности внесения доступной априорной информации с целью повышения точности оценки температуры за счет адекватного определения функций  $P_1(\lambda)$ ,  $P_2(\lambda)$ ,  $W_\sigma(x; \lambda)$  и пр.

#### Недостатки алгоритма:

- достаточно большие вычислительные затраты, связанные с определением значений интегральной функции правдоподобия для всех комбинаций переменных величин:  $\lambda$ ,  $T$  и  $\beta$ ;

- в тех случаях, когда условия измерения близки к нормальным, имеет место проигрыш по точности по сравнению с пирометрами частичного излучения;
- невысокая достоверность результатов измерений при наличии существенных искажений во всех спектральных интервалах.

Таким образом, ценность предложенного алгоритма оценки температуры заключается в существенном расширении возможностей спектральной пирометрии в плане адекватности результата анализа зарегистрированного спектра излучения объекта при наличии в нем интервалов со значительно искаженной формой. На практике, к примеру, это способствует уменьшению дополнительной погрешности, вызванной появлением в среде распространения газовых компонент различной природы. Тем не менее, данный алгоритм должен быть усовершенствован, прежде всего, с точки зрения сокращения вычислительных затрат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионов, Б. Спектрально-статистический подход к бесконтактному измерению температуры. / Б.П. Ионов, А.Б. Ионов. // Датчики и системы. – 2009. – №2. – С. 9-12.
2. Магунов, А. Спектральная пирометрия. / А.Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5-28.
3. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
4. Тимофеев, Ю. Теоретические основы атмосферной оптики. / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2003. – 476 с.
5. Белл, Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. / Р. Дж. Белл. – М.: Мир, 1975. – 380 с.

Старший преподаватель, к.т.н. **А.Б. Ионов** – antionov@mail.ru; с.н.с., к.т.н. **Б.П. Ионов** – Омский государственный технический университет, кафедра «Радиотехнические устройства и системы диагностики», (3812)65-25-98; старший преподаватель, к.т.н. **Е.В. Румянцева** – iit\_omgtu@mail.ru, Омский государственный технический университет, кафедра «Информационно-измерительная техника», (3812)65-37-07; магистрант **А.И. Мирная** – aly\_mir@mail.ru, Омский государственный технический университет.