

# Высокотемпературная цифровая термографическая техника

В. А. Фираго

*Белорусский государственный университет, Минск, e-mail: firago@bsu.by*

Анализируются проблемы создания высокотемпературной термографической техники, предназначенных для наладки и последующего контроля сложных высокотемпературных процессов. Сформулированы основные принципы снижения неопределенности измерения температуры термографической техникой в диапазоне температур от 800 до 2500 °С. Приведены расчетные выражения, позволяющие описать процесс формирования температурного поля при регистрации теплового излучения в трех участках спектра. Обсуждается способ формирования трех перекрывающихся участков спектра, сдвинутых в NIR диапазон спектра, основанный на использовании внешнего полосового светофильтра и комбинации спектральных характеристик RGB матриц фотоприемников. Рассмотрены вопросы обеспечения инвариантности результатов измерения  $T$  к размерам получаемого изображения и нестационарности шумов матрицы с приведением соответствующих примеров для высокотемпературного термографа на основе КМОП матрицы RGB фотоприемников MT9V034C12STC.

**Ключевые слова:** регистрация теплового излучения, тепловизионная техника, коэффициент теплового излучения, мультиспектральные методы пирометрии, RGB матрицы фотоприемников.

## Введение

Современные требования, предъявляемые к качеству выпускаемой продукции, заставляют вести обязательный контроль условий протекания технологических процессов. Контроль температуры  $T$  процесса – одно из основных требований современных стандартов, поскольку дает информацию, как о состоянии объектов, так и протекании разнообразных процессов [1, 2]. Недостаточное понимание физических основ бесконтактного определения  $T$  вызывает затруднения у пользователей термографической аппаратуры при интерпретации результатов измерений. В сложных случаях [3]: при неравномерном нагреве, динамическом изменении коэффициента теплового излучения, наличии внешней подсветки и т. п., возникают сомнения в достоверности измеряемых значений  $T$ . Особенно это проявляется в высокотемпературной термографии, где рекомендуемые производителями инфракрасной тепловизионной техники приемы [1, 4] по устранению влияния неизвестных факторов неприменимы из-за высокой температуры объектов. Поэтому в сложных условиях приходится применять термографическую технику, использующую несколько участков спектра [3]. Цель работы – обобщение основных решений, позволяющих снизить неопределенность измерения температуры мультиспектральной тепловизионной техникой видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра.

## 1. Особенности формирования высокотемпературного излучения

Бесконтактное измерение высоких температур имеет особенности, связанные с изменением коэффициента теплового излучения контролируемых объектов во время их нагрева и флуктуациями регистрируемых тепловых потоков. Эти флуктуации вызваны изменениями температуры поверхности контролируемых объектов за счет воздействия конвекционных воздушных потоков, а также статистической природой излучения фотонов нагретой поверхностью. Например, тепловое излучение металлов формируется фотонами, возникающими при квантовых процессах в тонком поверхностном слое металлов, толщиной около 4 нм. Поэтому степень шероховатости поверхности, ее окисление атмосферным кислородом, наличие загрязнений и т. п. могут приводить при нагреве до высоких температур к существенному изменению спектральной зависимости коэффициента теплового излучения  $\varepsilon(\lambda)$  по сравнению с табличными значениями, приводимыми в справочниках. Кроме того, свой вклад в погрешность измерения температуры  $T$  будут вносить и другие факторы, связанные с условиями наблюдения нагреваемой

поверхности и параметрами фотоприемного тракта термографической техники. Поэтому в ее программное обеспечение необходимо внедрять алгоритмы, позволяющие учитывать влияние неизвестного коэффициента теплового излучения  $\varepsilon$  и отмеченных флуктуаций регистрируемых тепловых потоков.

## 2. Специфика мультиспектральной термографии

Высокотемпературные тепловизоры, имеющиеся на мировом рынке, выполнены на основе монохромных матриц фотоприемников и регистрируют тепловое излучение в одном участке спектра. Их применяют при контроле процессов с устойчиво повторяющимися параметрами. Это позволяет при отсутствии сведений о значении коэффициента теплового излучения контролируемых объектов пользоваться только условной температурой, т. е. температурой частичной радиации  $T_r$ . Температурные отклонения технологических процессов при этом контролируются по отклонению  $T_r$  от заданных границ диапазона допустимых значений.

При необходимости в процессе наладки термического процесса измерять температуру, близкую к истинной, необходимо применять методы и термографическую аппаратуру, которые учитывают влияние неизвестного коэффициента теплового излучения и неизбежное наличие флуктуаций интенсивности регистрируемых потоков теплового излучения. Методы уменьшения влияния  $\varepsilon$  и излучения окружающей среды, которыми пользуются в тепловидении среднего инфракрасного диапазона спектра (LWIR), в высокотемпературной термографии неприменимы. Поэтому исследователи различных стран проявляют интерес к мультиспектральной термографии и создают соответствующие лабораторные образцы [5]. Численное моделирование и практическая апробация способов мультиспектральной термографии убеждают, что для решения практических задач контроля термических процессов достаточно использовать регистрацию теплового в трех участках спектра [6]. При использовании четырех и более участков спектра сильно возрастают требования к отношению сигнал/шум и линейности спектральных характеристик применяемой матрицы фотоприемников.

Необходимо отметить, что в сложных случаях, например при контроле лазерных процессов закалки или сварки, возможно применение способов, основанных на обработке спектра теплового излучения, формирующегося в области воздействия лазерного луча [7].

## 3. Трехспектральная техника на основе RGB матриц фотоприемников

В оптимальном для измерения высоких температур участке спектра на стыке видимого и NIR диапазонов спектра можно использовать термографы на основе RGB матриц фотоприемников. Применение внешнего полосового светофильтра и комбинации сигналов, формируемых RGB матрицей, дает возможность регистрации теплового излучения одновременно в трех перекрывающихся участках спектра. Для повышения устойчивости решения системы из трех нелинейных уравнений предлагается использовать априорные сведения о величине наклона  $b$  зависимости  $\varepsilon(\lambda)$  чистой неокисленной поверхности обрабатываемых материалов, которые можно найти в справочниках. Заметим, что при окислении поверхности  $\varepsilon$  растет, а  $b$  падает почти до нуля. Поэтому для упрощения учета окисления поверхности атмосферным кислородом при ее нагреве, можно использовать связь между значениями  $b$  и  $\varepsilon_2$  в виде  $b = \gamma \cdot p(\varepsilon_2)$ , где  $p(\varepsilon_2)$  – полином второй степени с заданными значениями коэффициентов  $p_2$ ,  $p_1$  и  $p_0$ , а  $\varepsilon_2$  – коэффициент теплового излучения во втором спектральном участке. Например, при описании связи между значениями  $b$  и  $\varepsilon_2$  для тел с возможными пределами изменения коэффициента теплового излучения  $0,05 < \varepsilon_2 < 1$  можно использовать степенной полином вида

$$b = \gamma \left( -\frac{80}{361} \varepsilon_2^2 + \frac{8}{361} \varepsilon_2 + \frac{72}{361} \right), \quad (1)$$

который описывает плавное снижение абсолютного значения  $|b|$  при увеличении  $\varepsilon_2$  в процессе окисления поверхности. Значения  $\gamma < 0$  характерны для металлов, а  $\gamma > 0$  – для диэлектриков. Так как спектральные зависимости коэффициентов теплового излучения большинства конструкционных материалов известны, по величине  $b$  и  $\varepsilon_2$  чистого неокисленного материала заранее рассчитывают значение  $\gamma$ , что обеспечивает адекватный расчет  $b$  при изменении значения  $\varepsilon_2$ . Для матрицы MT9V034C12STC обсуждаются способы обеспечения инвариантности измеряемых значений максимальной температуры  $T_{\max}$  к размерам изображения контролируемых тел и дисперсии шумов.

### Заключение

Соблюдение основных принципов снижения неопределенности измерения температуры и внедрение в алгоритмы работы предложенных решений позволяет создавать на основе современных RGB матриц кремниевых фотоприемников достаточно дешевую термографическую аппаратуру для наладки и последующего контроля сложных термических процессов.

### Литература

1. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer International Publishing. 2020.
2. Vollmer M. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Second Edition. Wiley, 2018.
3. Фираго В.А. *Цифровая термография*. Минск, 2019.
4. Ruddock R. W. *Basic Infrared Thermography Principles*. Reliabilityweb.com Press. 2010.
5. Qu D., Berry J., Calta N.P. et al. Temperature Measurement of Laser-Irradiated Metals Using Hyperspectral Imaging. *Phys. Rev. Applied*. 2020. Vol.14, № 1. P. 12.
6. Firago V., Wojcik W. High-temperature three-colour thermal imager. *Przegląd Elektrotechniczny*. ISSN 0033-2097. 2015. Vol. 91, No 2. P. 208–214.
7. Firago V.A., Wojcik W., Dzhunisbekov M.S. Monitoring of the Metal Surface Temperature during Laser Processing. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 11. P. 1224–1230.

## High temperature digital thermography technique

V.A. Firago

*Belarusian State University, Minsk, e-mail: firago@bsu.by*

The problems of creating high-temperature thermographic equipment intended for adjustment and subsequent control of complex high-temperature processes are analyzed. The basic principles of reducing the uncertainty of temperature measurement by thermographic technology in the temperature range from 800 to 2500 °C are formulated. The calculation expressions are given that allow describing the process of formation of the temperature field, when registering thermal radiation in three sections of the spectrum. A method for the formation of three overlapping spectral regions shifted in the NIR spectral range, based on the use of an external bandpass filter and a combination of the spectral characteristics of RGB matrices of photodetectors, is discussed. The issues of ensuring the invariance of the measurement results  $T$  to the dimensions of the resulting image and the nonstationarity of the matrix noise are considered. The corresponding examples are given for a high-temperature thermograph based on an RGB matrix of MT9V034C12STC photodetectors.

**Keywords:** registration of thermal radiation, thermal imaging equipment, thermal radiation coefficient, multispectral pyrometry methods, RGB matrix of photodetectors.