



ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ПИРОМЕТРИЯ

В. А. ПОРЕВ

Рассмотрены некоторые аспекты нового направления пирометрии излучения — телевизионной пирометрии. Проанализированы особенности определения эффективной длины волны, связанные с неоднородностью чувствительности ПЗС-матрицы и нелинейностью светосигнальной характеристики. Обоснована возможность повышения разрешающей способности телевизионного пирометра без изменения его оптической схемы. На примере задачи контроля температурного поля зоны плавки показаны пути уменьшения методических погрешностей, обусловленных влиянием излучения сторонних источников и изменением коэффициента пропускания.

The paper deals with some aspects of the new direction of radiation pyrometry, namely TV pyrometry. Features of determination of an effective wave length are analysed, which are related to non-uniformity of the sensitivity of CCD-matrix and non-linearity of the light signal characteristics. A possibility of improving the resolution of TV pyrometer without changing its optical schematic is substantiated. The problem of control of the temperature field of the melting zone is used to demonstrate the ways to reduce procedural errors, due to the influence of radiation of external sources and change of transmissivity.

Расширение номенклатуры и рост удельного веса высоких технологий с одновременным повышением требований к методологии их контроля стимулировали качественное развитие пирометрии излучения и привели к возникновению и становлению телевизионной пирометрии, возможности которой трудно переоценить.

В настоящее время накоплен достаточный опыт создания и эксплуатации телевизионных пирометров (ТП), на основании которого можно сделать вывод о том, что они образуют особый класс технических средств НК. Состав конкретного прибора обуславливается спецификой задачи и типом светоэлектрического преобразователя (СЭП), но с учетом накопленного на сегодня материала можно считать, что основными модулями ТП являются оптическая система, передающая телевизионная камера, в которую входят СЭП и формирователь сигнала, а также компьютер [1]. В некоторых ТП в перечне обязательных модулей имеется устройство ввода видеосигнала в компьютер, однако видеoadаптеры современных компьютеров позволяют в большинстве случаев отказаться от отдельных устройств ввода.

Физически работа ТП базируется на последовательности преобразований потока излучения, попадающего во входную апертуру. Основной количественной характеристикой оптического поля, образующего поток излучения в спектральном диапазоне $\lambda \dots \lambda + d\lambda$ с элементарного участка поверхности в телесный угол, опирающийся на входную апертуру прибора, является спектральная яркость $L_\lambda(x, y)$. Анализ этой функции в ТП проводится путем выборки (формированием отсчетов в заданных точках) при помощи электронной развертки и заключается в преобразовании пространственной функции в совокупность электрических сигналов. Конечным звеном всей последовательности преобразований является цифровой сигнал, пропорциональный значению входного сигнала.

Таким образом, ТП можно рассматривать как прибор, предназначенный для измерения температуры объекта путем формирования и электронной развертки его изображения с последующим уста-

новлением соответствия между яркостью элемента разложения в предметной плоскости и амплитудой сигнала, образованного сопряженным элементом разложения в плоскости изображения.

Размеры элемента разложения (пиксела) определяются типом СЭП и могут находиться в диапазоне от единиц до десятков микрометров. Фактически СЭП представляет собой упорядоченную матрицу, состоящую из большого количества микропреобразователей. Это обстоятельство вместе с малым (десятки миллисекунд) временем формирования сигнала всей матрицы является принципиальной особенностью ТП, открывающей широкие перспективы использования его в НК и научных исследованиях [2].

Телевизионная пирометрия имеет общую с традиционной пирометрией излучения теоретическую базу и в то же время, благодаря особенностям формирования сигнала, позволяет решать научные и технологические задачи на качественно новом уровне.

По сравнению с другими пирометрами ТП имеют наибольший показатель потенциальных возможностей, который можно определить следующим образом:

$$\varepsilon = N / (\Delta\tau), \quad (1)$$

где N — формат выборки; Δ — линейный размер пиксела; τ — время формирования выборки.

Кроме того, на мишени одного и того же СЭП может быть сформировано несколько изображений объекта на разных участках спектральной характеристики, т. е. реализован мультиспектральный пирометр на едином преобразователе. Аналогично могут быть сформированы изображения объекта и эталонного источника, что очень важно в метрологическом аспекте.

При этом ТП предоставляют возможность не только оперативно контролировать температурное поле на поверхности объекта, но и определять геометрические параметры температурных фрагментов, осуществлять их селекцию.

Указанные особенности настолько принципиальны, что требуют пересмотра устоявшихся представлений о потенциальных возможностях пиро-



метрии излучения, начиная от расширения круга задач и заканчивая новыми требованиями к обеспечению адекватности технических средств, что фактически означает создание методологии нового направления пирометрии излучения — телевизионной пирометрии.

Концепция использования телевизионных систем для контроля оптических полей базируется на предположении о том, что СЭП представляет собой упорядоченную совокупность идентичных и независимых преобразователей, что в общем случае выполняется очень редко. Практически адекватность реальных характеристик и указанного выше предположения может быть обеспечена коррекцией светосигнальной характеристики и работой ТП в диапазоне линейности.

В телевизионной пирометрии коррекция светосигнальной характеристики осуществляется программно путем формирования матрицы весовых коэффициентов C_{ij} при одинаковой освещенности всех пиксел. При измерениях формируется выборка $C_{ij}A_{ij}$, где A_{ij} — текущее значение амплитуды сигнала пиксела с координатами (i, j) .

Линейный участок светосигнальной характеристики СЭП определяется совокупностью точек, для которых модуль разности среднего значения амплитуды сигнала и значения, взятого с аппроксимирующей прямой при одной и той же освещенности в заданное число раз меньше среднего квадратического отклонения результата измерения. Установлением диапазона линейности ТП уточняются также границы применимости теории линейных систем и критериев, базирующихся на использовании функции передачи модуляции (ФПМ).

Развитие и внедрение пространственно-частотных представлений в практику анализа телевизионных систем позволили определять их разрешающую способность через ФПМ и некоторый пороговый уровень контраста, что является более строгой оценкой по сравнению с той, когда разрешение в плоскости изображения определяется размером пиксела.

Для количественных оценок порогового уровня контраста $K_{\text{п}}$ возможно использование разных методик. Наиболее адекватной, по-видимому, следует считать изложенную в [3], где пороговый контраст определяется для заданного значения вероятности p регистрации сигнала с учетом входного контраста $K_{\text{вх}}$ и показателя степени светосигнальной характеристики $\gamma(E)$:

$$K_{\text{вх}}\gamma(E)K_{\text{п}}q(E) = q_{\text{п}}(p), \quad (2)$$

где $q(E)$, $q_{\text{п}}(p)$ — отношение амплитуд сигнала и шума при освещенности E и пороговое отношение при заданной вероятности регистрации.

Разрешающая способность ТП определяется по ширине суммарной кривой ФПМ как величина, обратная пространственной частоте, на которой нормированный коэффициент передачи контраста отождествляется с пороговым контрастом. При условии, что $\gamma(E) = 1$, т. е. СЭП работает в диапазоне линейности,

$$K_{\text{п}} = \frac{q_{\text{п}}(p)}{K_{\text{вх}}q(E)}. \quad (3)$$

Используя зависимость амплитуды сигнала пиксела от соотношения площадей освещенного и неосвещенного участков, можно в некоторых задачах увеличить разрешающую способность ТП. Пусть в момент времени t амплитуда сигнала пиксела $A(t)$, а реализация шума $A_{\text{ш}}(t)$. Определив порог регистрации $A_{\text{п}}$, установим, что сигнал $A(t)$ может быть зарегистрирован при условии $A_{\text{ш}}(t) < A(t) - A_{\text{п}}$. С учетом среднего шумового сигнала пиксела $A_{\text{ш}}$ введем значения

$$a_1 = \frac{A(t)}{A_{\text{ш}}}, a_2 = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{ш}}}, a_3 = \frac{A_{\text{ш}}(t)}{A_{\text{ш}}}.$$

Тогда условие регистрации $a_3 < a_1 - a_2$.

Полагая, что шум СЭП подчиняется нормальному закону распределения, вероятность регистрации сигнала определим следующим образом:

$$p(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (4)$$

где z — переменная интегрирования.

Воспользовавшись табличными значениями нормированной функции Лапласа, получим, например, для $a_2 = 1$, что вероятность $P(a_3 < a_1 - a_2) = 0,99$ будет обеспечена при $A(t) = 3,2A_{\text{ш}}$. Если такой сигнал при освещенности E_0 образован частью пиксела, то количество участков, которые могут быть разрешены в пределах пиксела, определится соотношением

$$N = \frac{A_0}{3,2A_{\text{ш}}}, \quad (5)$$

где A_0 — амплитуда сигнала, образованного полностью освещенным пикселом при освещенности E_0 .

Используя указанную зависимость, можно без изменения структуры и оптической системы ТП увеличить его разрешающую способность, что имеет первостепенное значение в задачах контроля малых перемещений, где требуется высокая точность определения координат. Наиболее достоверные экспериментальные результаты в этом плане получены в работе [4], где утверждается, что метод интерполяции сигнала ПЗС-матрицы повышает точность определения координат до уровня, ограниченного дисперсией шума СЭП, а разрешение современных ПЗС может быть доведено до значений порядка 1...2 мкм.

Принципиальной особенностью пирометрии излучения является доминирование методической погрешности измерения над инструментальной. Основными источниками первой являются погрешности определения эффективной длины волны λ_3 и коэффициента излучательной способности объекта, влияние излучения посторонних источников и изменение коэффициента пропускания среды. Первые два имеют общий для всех пирометрических



задач характер, и для уменьшения их влияния можно использовать универсальные методы [5].

Однако определение эффективной длины волны в телевизионной пирометрии имеет некоторые особенности, связанные с тем, что ее значение λ_3 может оказаться различным для разных участков СЭП или даже для отдельных пиксел. А это в свою очередь может привести к дополнительным погрешностям измерения температуры, особенно если изображение объекта занимает значительную часть мишени СЭП. Очевидно, что при определенных условиях вклад погрешности определения значения λ_3 в суммарную погрешность измерения температуры может оказаться весьма значительным.

Используя методику, приведенную в [5], несложно получить формулу, позволяющую вычислить λ_3 по измерению сигналов $A_{ij}(T_1)$ и $A_{pk}(T_2)$, образованных при разных температурах T_1 и T_2 разными пикселями с учетом различий их коэффициентов преобразования b_{ij} и b_{pk} :

$$d\lambda_3 = \frac{C_2[T_2^{-1} - T_1^{-1}]}{\ln \frac{A_{ij}(T_1)}{A_{pk}(T_2)} - \ln \frac{b_{pk}}{b_{ij}}} \quad (6)$$

При $b_{ij} = b_{pk}$ получим известное выражение

$$\lambda_3 = \frac{C_2[T_2^{-1} - T_1^{-1}]}{\ln \frac{A_{ij}(T_1)}{A_{pk}(T_2)}} \quad (7)$$

Что же касается вопросов уменьшения или компенсации погрешностей, обусловленных излучением стороннего источника или изменением коэффициента пропускания среды, то их корректное решение возможно только при учете всех особенностей конкретной задачи.

Влияние излучения сторонних источников на результаты исследования температурных полей и соответствующие аналитические методы его учета рассмотрены, например, в работе [6]. Сложность использования этих методов состоит в том, что они разработаны для простых конфигураций системы объект–сторонний источник и в предположении диффузного отражения. Поэтому ими пользуются в основном для приближенных оценок, а на практике предпочтение отдают аппаратным методам. В тех случаях, когда исключение или существенное уменьшение компонента стороннего излучения невозможно, более перспективными будут методы, основанные на введении этого компонента в структуру алгоритма вычисления результата. Укажем в качестве примера, иллюстрирующего преимущества телевизионной пирометрии, на метод компенсации влияния излучения электрода в задаче контроля параметров электронно-лучевой плавки, схема которой представлена в [7].

В этой схеме оптическая система формирует на мишени СЭП изображение части электрода и фрагмента зоны плавки. Яркость электрода $L_d(\lambda_3, T_d)$, а амплитуда сигнала, образованного соответствующим пикселем, — $A_d(T_d)$. Фрагмент зоны плавки характеризуется эффективной яркостью $L_3 =$

(λ_3, T_3) , при этом образуется сигнал $A_3(T_3)$. Изменения яркости локального участка этой зоны могут быть обусловлены изменением как температуры этого участка, так и яркости электрода. Введя в алгоритм формирования сигнала дополнительный компонент, изменяющийся в соответствии со случайными изменениями $L_d(\lambda_3, T_d)$, и образуя алгебраическую сумму амплитуды сигналов $A_3(T_3)$ и $A_d(T_d)$ с соответствующим весовым коэффициентом, компенсируем влияние излучения электрода на результат анализа температурного поля зоны плавки. Значение весового коэффициента определяется при градуировке ТП.

Проблема влияния коэффициента пропускания среды на результат измерения температуры в общем случае не может быть решена введением поправок [8]. Например, в рассмотренной выше задаче контроля параметров зоны плавки, которая проводится в вакуумной камере, степень загрязнения иллюминатора, т. е. коэффициент пропускания, зависит от типа кристалла, типа и концентрации примесей, их распределения по кристаллу, плотности электронного пучка, давления и конфигурации магнитного поля в камере и скорости перемещения зоны плавки. Для коррекции изменения коэффициента пропускания в этом случае можно также использовать излучение электрода. А чтобы исключить влияние локальных изменений яркости поверхности электрода, коррекцию необходимо проводить, используя среднее значение сигналов, образованных несколькими пикселями.

В тех случаях, когда технологический процесс проводится при температурах, меньших 400 °С, весьма перспективной для НК может оказаться пировидиконная телевизионная система, имеющая практически равномерную спектральную характеристику в диапазоне 0,4...12,0 мкм и не требующая охлаждения. Однако потенциальные возможности пировидиконных систем в значительной мере ограничиваются их низкой разрешающей способностью. Анализ этого вопроса и некоторые аспекты повышения разрешающей способности освещены в работах [9, 10], где указывается, что повысить разрешающую способность этих систем можно технологическими мерами — используя пироэлектрический материал с уменьшенным коэффициентом термодиффузии, изготавливая мишень в виде мозаики из отдельных элементов с одновременным заполнением межэлементного пространства теплоизолирующим материалом. Однако в результате этих и аналогичных технологических приемов в лучшем случае будут созданы только предпосылки для достижения более высоких значений разрешающей способности. А будут ли они реализованы — это определится условиями формирования сигнала, главным образом, скоростью перемещения изображения по мишени и временем формирования кадра. Дело в том, что чувствительность пировидикона различна в режимах панорамирования и обтюрации. В частности, наиболее перспективный на сегодня пировидикон РЕМЕТ имеет чувствительность в режиме панорамирования 100, в режиме обтюрации — 10 мкА/Вт [11]. Следовательно,



в ряде задач НК предпочтительным окажется режим панорамирования, при котором ФПМ определяется следующим выражением [10]:

$$H(f_x) = \frac{\sin \pi f_x v \tau_k}{\pi f_x v \tau_k} \left[1 + \left(\frac{2\pi f_x D_T}{v} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \exp(-2\pi^2 f_x^2 (r_o^2 + r_p^2)), \quad (8)$$

где τ_k — время формирования кадра; f_x — пространственная частота; v — скорость перемещения изображения по мишени пировидикона; D_T — коэффициент температуропроводности материала мишени; r_o, r_p — радиусы пятен рассеяния объекта и электронного пучка на уровне интенсивности 0,606 от максимального значения.

Анализ формулы (8) позволяет сделать вывод о наличии такого значения скорости v_0 перемещения изображения по мишени, при котором выходной контраст для всех пространственных частот и разрешающая способность, определяемая указанным выше способом, будут иметь максимальные значения. В этом заключается принципиальное отличие пировидикона от других СЭП.

Физически зависимость коэффициента передачи контраста от v объясняется совместным действием механизма термодиффузии и инерционности пироэффекта. При $v > v_0$ сигнал уменьшается вследствие инерционности, а при $v < v_0$ главную роль играет термодиффузия.

Исследуя функцию $H(f_x)$, можно прийти к следующему выводу. Во-первых, она возрастает при уменьшении τ_k , но при этом уменьшается и образующий пикселом заряд. Следовательно, этот метод увеличения $H(f_x)$ можно использовать только при больших амплитудах входных сигналов.

Во-вторых, $H(f_x)$ возрастает при уменьшении r_o и r_p . Однако эта возможность ограничена как достигнутым уже технологическим пределом уменьшения радиуса электронного считывающего пучка, так и нецелесообразностью уменьшения r_o ниже $0,25r_p$, поскольку при этом коэффициент передачи контраста пировидиконной системы в целом практически не изменяется.

Следовательно, одно из возможных направлений повышения разрешающей способности пировидиконных приборов состоит в создании условий, при которых изображение объекта будет перемещаться по мишени со скоростью $v \approx v_0$.

Другое направление состоит в том, что работа пировидиконного прибора организуется циклами длительностью τ_k , а развертка осуществляется за время $t_p = \tau_k/n$, где n — целое число. Сигналы с мишени, каждый из которых образован за время t_p , суммируются в цикле. Суммируемый сигнал определяется длительностью цикла τ_k , т. е. остается таким же, как и при обычной развертке, а «растекание» зарядового рельефа уменьшается в \sqrt{n} раз [10]. Положительный эффект можно усилить, применив алгоритм, состоящий в том, что при первом считывании фиксируются координаты пикселов с ненулевым сигналом, а суммирование для них проводится без ограничений. Суммирование сигналов всех других пикселов начинается после K_p разверток. Значение K_p выбирается экспериментально и применительно к задаче.

1. Порев В. А. Телевизионный пирометр // Приб. и техника эксперимента. — 2002. — № 1. — С. 150.
2. Порев В. А. Аналіз параметрів зонної очистки за допомогою приладів з електронним розгортанням зображення // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — № 1. — С. 89.
3. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение. — М.: Связь, 1973.
4. Маслюков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-мех. пром-сть. — 1990. — № 4. — С. 70.
5. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
6. Ратцевич В. Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения. — Минск: Наука и техника, 1989.
7. Порев В. А. Компенсация излучения электрода при исследовании температурного поля зоны плавки // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 55.
8. Кириков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 140 с.
9. Кейзан Б. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображении / Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 311 с.
10. Порев В. А. Застосування півовідіконних приладів для аналізу оптичних полів // Вимір. та обчисл. техніка в технол. процесах. — 1998. — № 4. — С. 64.
11. Березкин Н. А., Дуи А. З., Меркин С. Ю. // Оптич. журн. — 1997. — 64, № 6. — С. 93.