УДК 621.307.13

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ТЕЛЕВІЗІЙНІ ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

І.В. Бойко *
Асистент кафедри

Є.О. Бєлорусов *
Асистент кафедри

Г.М. Згуровський *
Асистент кафедри

М.О. Маркін *
Аспірант кафедри

В.А. Порєв *
Доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою

* Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем Національного технічного університету „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна.
Контактний тел.: (044) 241-77-03

В статті проаналізована проблема використання телевізійного пірометра для вимірювання геометричних, енергетичних та динамічних параметрів різних об’єктів. Показана типова структура приладу. Представлені практичні рекомендації щодо підвищення точності телевізійних пірометрів

1. Вступ

Стан багатьох сучасних технологій не в останню чергу визначається науковим та технічним рівнем засобів контролю, значна частина яких базується на використанні оптичних методів. Особливе місце в неруйнівному контролі належить оптичній пірометрії, оскільки температура є найважливішим параметром технологічних процесів в багатьох галузях промисловості. Отже, актуальними для неруйнівного контролю завжди залишатимуться задачі створення ефективних методів та технічних засобів безконтактного вимірювання температури.

У відповідності з традиційними методами, які безпосередньо випливають із законів Стефана-Больцмана і Планка, визначення температури провадиться вимірюванням потоку власного випромінювання в певному спектральному діапазоні (моноспектральна пірометрія) або шляхом співставлення потоків в кількох спектральних діапазонах (мультиспектральна пірометрія).

Якщо температурні поля мають складну форму, малі розміри, значні поверхневі градієнти і дуже динамічний характер, то ефективний контроль можливий тільки за умови формування і аналізу зображення температурного поля в реальному масштабі часу і з високим просторовим розрізненням. Найбільш повно цим вимогам відповідають телевізійні пірометри (ТП), які при контролі температурних полів забезпечують виборку тисяч точок в реальному масштабі часу з найвищим на сьогодні просторовим розрізненням [2,3]. Така властивість ТП створює умови для підвищення ефективності контролю, а отже підвищення якості продукції в багатьох провідних технологіях, таких як лазерна обробка, електронно-променева технологія очистки та напилення в вакуумній камері тощо. Власне, виникнення і становлення телевізійної пірометрії значною мірою стимульоване зростанням питомої ваги високих технологій з одночасним підвищенням вимог до методології їх контролю. В той же час значна кількість питань мультиспектральної телевізійної пірометрії, важливих в теоретичному та практичному аспектах, не отримали належного висвітлення.

Зокрема, відсутні роботи, які б висвітлювали таке важливе питання телевізійної пірометрії як еквівалентна довжина хвилі мультиспектрального телевізійного пірометра, яка є надзвичайно важливою характеристикою і широко використовується в роботах [4,5] та інших, присвячених теорії та практиці пірометрії. Більше того, навіть поняття еквівалентної довжини хвилі мультиспектрального телевізійного пірометра є недостатньо визначеним, відсутні також методики та результати відповідних експериментальних досліджень, що може привести до помилок в оцінці перспектив або результатів використання мультиспектральних телевізійних пірометрів. Отже, на сьогодні проблема полягає не стільки в забезпе-

ченні мультиспектрального контролю високотемпературних технологій за допомогою телевізійних засобів, скільки в аналізі та вирішенні нових проблем, які при цьому виникають.

2. Структура телевізійного пірометра

Головними модулями ТП є оптична система, передавальна телевізійна камера, в склад якої входять світлоелектричний перетворювач (СЕП) і формувач сигналу, та комп'ютер [2].

Фізично робота ТП базується на послідовності перетворень потоку випромінення, що попадає у вхідну апертуру.

Аналіз функції яскравості, яка в даному випадку є кількісною характеристикою потоку, здійснюється шляхом формування виборки відліків і перетворенні просторової функції освітленості в сукупність електричних сигналів. Таким чином, ТП можна визначити як прилад, призначений для вимірювання температури шляхом формування зображення об'єкту з подальшим встановленням відповідності між яскравістю елемента розкладу в предметній площині та сигналом, утвореним спряженим елементом розкладу в площині зображень.

СЕП є упорядкованою матрицею великої кількості мікроперетворювачів, а концепція використання ТП базується на припущенні про їх незалежність та ідентичність.

Введення в склад оптичної системи світлоподільних елементів дозволяє реалізувати метод мультиспектрольної пірометрії (пірометрії спектрального відношення), який в певних випадках характеризується більшою точністю вимірювання температури.

Найчастіше в якості світлоподільних елементів використовуються призми або дихроїчні пластини, які дозволяють розділити єдиний потік на спектральні компоненти. Характеристики спектральної чутливості сучасних ПЗЗ -матриць перекривають ультрафіолетовий, видимий та ближній інфрачервоний діапазони. Отже, на мішені одного і того ж СЕП може бути сформовано декілька зображень об'єкта в різних ділянках спектральної характеристики, тобто, реалізовано мультиспектральний пірометр на єдиному перетворювачі, що має безумовні переваги в метрологічному аспекті.

3. Методика телевізійної пірометрії

Загальна методика використання телевізійних засобів для вимірювання геометричних, енергетичних та динамічних параметрів різних об'єктів полягає в формуванні телевізійного зображення об'єкту, перетворенні його в цифровий код та застосуванні алгоритмів обробки, які забезпечують визначення параметрів зображення.

Переважна кількість сучасних методів безконтактного вимірювання температурних полів базується на законі Планка, який встановлює зв'язок між спектральною щільністю енергетичної світимості випромінювання і температурою Т абсолютно чорного тіла (АЧТ)

$$L_\lambda^0(T) = \frac{C_1}{\lambda^5}\left[\exp\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right]^{-1}, \qquad (1)$$

де $C_1 = 3.74 \cdot 10^8$ Вт·мкм^4·м$^{-2}$;
$C_2 = 1.44 \cdot 10^4$ мкм·К.
λ — довжина хвилі випромінювання.

Якщо спектральний коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні $\varepsilon_\lambda(T)<1$, а

$\exp\frac{C_2}{\lambda T} >> 1$, то можлива більш компактна форма виразу (1)

$$L_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda(T)\frac{C_1}{\lambda^5}\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right). \qquad (2)$$

Використання формул (1), (2) дозволяє вимірювати дійсну температуру Т за так званими умовними температурами: яскравісною та спектрального відношення.

Яскравісною температурою $T_я$ тіла називають таку температуру АЧТ, при якій спектральні яскравості тіла $L_\lambda(T)$ і АЧТ $L_\lambda^0(T_я)$ однакові, тобто $L_\lambda^0(T_я)=L_\lambda(T)\varepsilon_\lambda(T)$ [34].

При $\lambda T<3000$ мкм·К зв'язок між Т і $T_я$ визначається так

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_я} + \frac{\lambda}{C_2}\ln\left[\varepsilon_\lambda(T)\right]. \qquad (3)$$

Температурою спектрального відношення $T_К$ деякого тіла називають таку температуру АЧТ, при якій відношення спектральних яскравостей цього тіла і АЧТ для двох довжин хвиль однакові. Якщо $L(\lambda_1,T)$ і $L(\lambda_2,T)$ — спектральні яскравості тіла для довжин хвиль λ_1 і λ_2, а $L^0(\lambda_1,T)$ і $L^0(\lambda_2,T)$ — спектральні яскравості АЧТ, то визначення температури тіла забезпечується слідуючим співвідношенням

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1,T)L(\lambda_1,T)}{\varepsilon(\lambda_2,T)L(\lambda_2,T)} = \frac{L^0(\lambda_1,T)}{L^0(\lambda_2,T)}. \qquad (4)$$

Використавши формулу (2), отримаємо

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_К} = \frac{\ln\frac{\varepsilon(\lambda_1,T)}{\varepsilon(\lambda_2,T)}}{C_2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}. \qquad (5)$$

Аналіз формули (5) показує, що при $\varepsilon(\lambda_1,T)=\varepsilon(\lambda_2,T)$ маємо $T=T_К$, а в інших випадках істинна температура тіла може бути як більшою, так і меншою від температури спектрального відношення. Дійсно, нехай $\lambda_2>\lambda_1$, тоді знак різниці $T–T_К$ визначиться співвідношенням між $\varepsilon(\lambda_1,T)$ і $\varepsilon(\lambda_2,T)$. При $\varepsilon(\lambda_1,T)>\varepsilon(\lambda_2,T)$ матимемо $T<T_К$, а при $\varepsilon(\lambda_1,T)<\varepsilon(\lambda_2,T)$ $T>T_К$.

Формула (5) є математичною базою для реалізації мультиспектральної (в даному випадку біспектральної) телевізійної пірометрії.

Вибір методу (яскравісного чи спектрального відношення) обумовлюється специфікою конкретної задачі [6] і передбачає попередній аналіз методичних похибок: методу спектрального відношення та яскравісного методу. Відомо, що пірометри спектрального відношення характеризуються потенційно більшою точністю в широкому діапазоні температур і випромінювальної здатності, але методична похибка яскравісних пірометрів, які використовуються для вимірювання температури одного і того ж об'єкту при

наявності випромінювання сторонніх джерел, може бути меншою [5, 7].

Важливо також, що оптична схема яскравісного методу є більш простою порівняно з оптичною схемою методу спектрального відношення.

4. Метрологічні аспекти телевізійної пірометрії

Основними складовими методичної похибки, яка в пірометрії випромінення домінує над інструментальною, є вплив випромінення сторонніх джерел, змін коефіцієнта пропускання та неповнота інформації про коефіцієнт випромінювальної здатності. Перші два джерела мають загальний характер для будь – яких схемотехнічних реалізацій та для всіх пірометричних задач. Отже, для зменшення їх впливу можна використовувати відомі методи [4,5]. А зменшення впливу третьої складової, власне, і є суттю мультиспектральної пірометрії.

В телевізійній пірометрії, крім названих, необхідно враховувати також похибку вимірювання температури, яка обумовлена похибкою визначення ефективної (моноспектральні методи) та еквівалентної (мультиспектральні методи) довжини хвилі. Поняття ефективної λ_e (еквівалентної $\lambda_к$) довжини хвилі (ЕДХ) широко використовуються в традиційній пірометрії і визначається як довжина хвилі умовного монохроматичного випромінення, під дією якого сформувався б такий же сигнал, як реальний [4].

В практиці пірометрії ЕДХ може бути визначена за сигналами, які сформовані при різних температурах одного и того ж об'єкта. При цьому значення температур доцільно вибирати в діапазоні, який відповідає реальній задачі.

Похибку вимірювання температури ΔT, обумовлену похибкою визначення ефективної довжини хвилі $\Delta\lambda_e$, можна визначити продиференціювавши формулу (3)

$$\Delta T = \frac{T^2}{C_2}\Delta\lambda_e \ln\varepsilon(\lambda_e, T) \qquad (6)$$

Похибку вимірювання температури спектрального відношення $\Delta T_к$, обумовлену похибкою визначення $\Delta\lambda_к$, можна знайти аналогічно

$$\delta_K = T_K \frac{\ln\dfrac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}}{C_2\left(\dfrac{1}{\lambda_1} - \dfrac{1}{\lambda_2}\right)}. \qquad (7)$$

З формул (6), (7) видно, що внесок похибки визначення λ_e чи $\lambda_к$ в сумарну похибку вимірювання температури може виявитися досить значним для високих температур.

При цьому треба також враховувати особливості телевізійних засобів вимірювання, пов'язані з тим, що значення λ_e і $\lambda_к$ можуть виявитися різними для різних ділянок СЕП. В телевізійній пірометрії, де зображення об'єкту може займати значну частину мішені СЕП, це може привести до додаткових похибок вимірювання температури. Тому λ_e і $\lambda_к$ необхідно визначати не тільки для центральної частини мішені, але і для периферійних ділянок.

В метрології пірометрії широко використовуються еталонні температурні лампи, наприклад, СИ10 – 300, для яких при одному і тому ж значенні струму яскравості центральної і периферійних ділянок суттєво відрізняються. Для телевізійної пірометрії ця обставина є дуже важливою, оскільки навіть в межах центральної ділянки формується кілька окремих піксел, сигнали з яких будуть відрізнятися. Похибки можна уникнути, якщо використовувати один і той же піксел, положення якого задавати у системі координат тіла розжарення лампи.

5. Висновки

Телевізійні пірометри, які забезпечують виборку тисяч точок в реальному масштабі часу з найвищим на сьогодні просторовим розрізненням, є адекватним засобом контролю динамічних температурних полів складної форми.

Ефективну (еквівалентну) довжину хвилі необхідно визначати не тільки для центральної частини мішені світлоелектричного перетворювача, але і для периферійних ділянок.

Для зменшення похибки градуювання мультиспектрального телевізійного пірометра необхідно використовувати один і той же піксел, положення якого задавати у системі координат тіла розжарення еталонної лампи.

Література

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев и др.—М.: Машиностроение, 1985.—496 с.
2. Порев В.А. Телевизионный пирометр // Приборы и техника эксперимента, 2002, №1, с.150.
3. Бойко І.В., Приміський В.П. Телевізійні прилади як засоби контролю високотемпературних промислових технологій та електронно-променевої і лазерної обробки матеріалів // ВОТТП.—2003.—№.4.-С.47-50.
4. Киренков И.И. Метрологические основы оптической пирометрии.—М.: Издательство стандартов, 1976.— 140 с.
5. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур.—М.: Наука, 1982.—296 с.
6. Бойко І.В. Мультиспектральні телевізійні прилади контролю високотемпературних полів // Тези доповіді конференції "Приладобудування 2003".—Київ: НТУУ "КПІ".—2003.—С.118.