

УДК 621.307.13

ВПЛИВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ДОВЖИНИ ХВИЛІ НА ТОЧНІСТЬ БІСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ПІРОМЕТРА**М.О. Маркін, О.М. Маркіна, В.А. Порєв**

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут”, м. Київ

кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

E-mail: prof@barvinok.net**Abstract**

Markin M.O., Markina O.M., Poryev V.A. The influence of the equivalent wavelength to the accuracy of the bispectral television pyrometer. The problem of using the bispectral television pyrometer for the measurement of the temperature of the melting zone is analyzed. The influence of the error in the determination of the equivalent wavelength to the error of the temperature measurement is analyzed. The practical recommendations on the increasing the accuracy of bispectral television pyrometers is presented.

Загальна постановка проблеми. Значна частина сучасних енергозберігаючих технологій базується на підтриманні заданих температурних режимів, що неможливо без наявності адекватних технічних засобів для вимірювання температури.

Врахуємо також, що сьогодні біля 75% всіх операцій контролю у високих технологіях провадиться за допомогою телевізійних інформаційних вимірювальних систем [1]. І якщо мова йде про високотемпературні технології – це телевізійні пірометри.

Телевізійна пірометрія, тобто сукупність методів і засобів визначення температури шляхом вимірювання потоку власного випромінювання в певному спектральному діапазоні (моноспектральна пірометрія) або шляхом співставлення потоків в кількох спектральних діапазонах (мультиспектральна пірометрія), охоплює область вимірювальної техніки, яка включає теорію і практику вимірювання високих температур телевізійними засобами і є надзвичайно ефективним інструментом теплового неруйнівного контролю [2].

Телевізійна пірометрія завдяки особливостям формування сигналу дозволяє вирішувати сучасні наукові та технологічні задачі на якісно новому рівні, зокрема, моноспектральний телевізійний пірометр (ТП) при контролі температурних полів забезпечує вибірку сотень тисяч точок в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням. Ця властивість ТП створює умови для підвищення ефективності контролю, а отже, підвищення якості продукції в багатьох провідних технологіях, таких як, лазерна обробка, зварювання, електронно-променева технологія зонної плавки [3,4] тощо.

Але суттєвим обмеженням сфери застосування моноспектральної телевізійної пірометрії є принципова залежність результатів вимірювання від апріорних знань про коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкту та його поведінку в діапазоні вимірювань. В той же час мультиспектральний телевізійний пірометр (МТП) за тих же умов забезпечує потенційно більш високу точність вимірювання. Зрозуміло, що це відкриває нові можливості для підвищення вірогідності контролю температурних режимів, а отже, для підвищення якості продукції, наприклад, в енергозберігаючих електронно-променевих технологіях отримання нових матеріалів, а також в інших споріднених технологіях.

На жаль, до цього часу практично залишаються поза увагою дослідників проблеми мультиспектральної пірометрії. В літературі відсутні систематизовані дані про технічні засоби, достовірні результати їх використання в науковій чи технологічній практиці. Окремі

публікації з цієї тематики не підтверджені обґрунтуванням та дослідженнями технічних характеристик, оцінкою потенційних можливостей тощо.

Відсутні дослідження математичних моделей пірометричного сигналу МТП, відсутні дослідження впливу характеристик МТП на похибку вимірювання температури. Зокрема, відсутні роботи, які б висвітлювали таке важливе питання пірометрії як роль еквівалентної довжини хвилі (ЕкДХ) мультиспектрального телевізійного пірометра в формуванні похибки вимірювання температури.

В той же час відомо, що ЕкДХ є надзвичайно важливою характеристикою і широко використовується в роботах, присвячених теорії та практиці пірометрії [5].

Це означає, що фактично сьогодні не створена потенційно найбільш ефективна методологія контролю температури, можливості якої повністю б відповідали потребам енергозберігаючих електронно–променевих технологій отримання нових матеріалів.

Елементна база телевізійної системотехніки на сьогодні має практично однакові параметри в усіх розвинених країнах, а технологія виробництва телевізійних систем досягла високого рівня і намітилась тенденція до стабілізації.

Отже, істотне підвищення ефективності ТП можливе тільки на шляху вдосконалення методології їх застосування та за рахунок підвищення точності визначення тих характеристик, які не паспортизуються виробниками телевізійних камер, але є важливими з точки зору їх використання як засобів вимірювання.

Зрозуміло, що без дослідження питань, пов'язаних з формуванням похибок вимірювання температури, зокрема, без дослідження впливу ЕкДХ на точність МТП, розвиток мультиспектральної телевізійної пірометрії неможливий.

Постановка задачі. Концептуальні аспекти застосування телевізійних інформаційних вимірювальних систем та, відповідно, умови, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки найбільш повно трансформуються в характеристики ТП, проаналізовані в роботі [6].

Схема формування інформаційного сигналу в телевізійній пірометрії представлена на рис. 1.

T=?

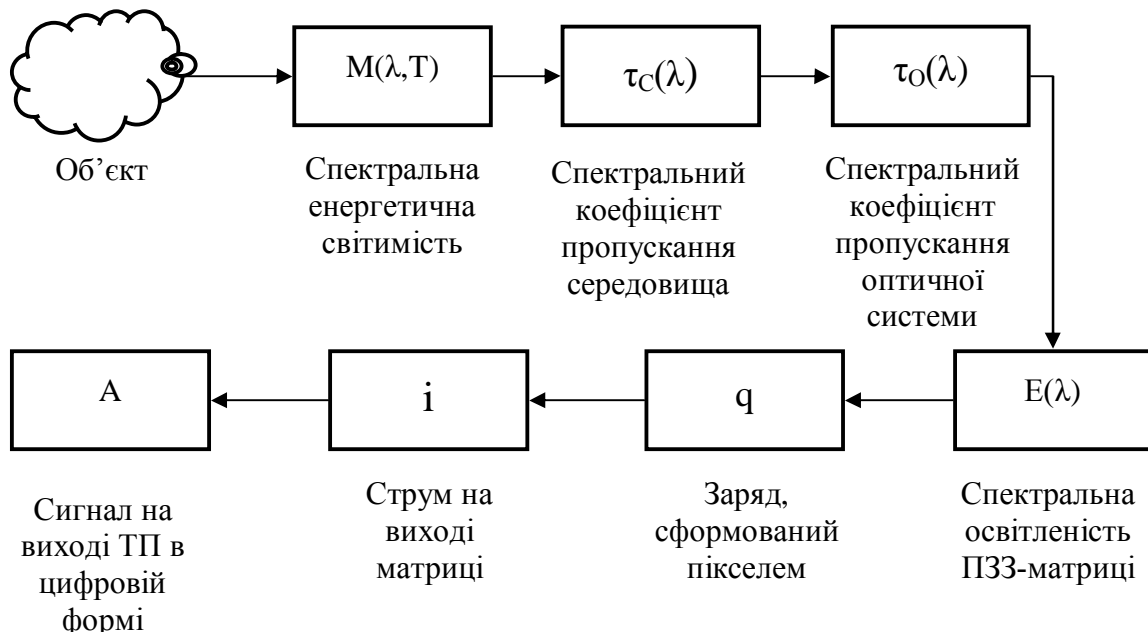


Рис. 1. Схема формування інформаційного сигналу в ТП

Фізично робота ТП базується на послідовності перетворень потоку випромінення, що попадає у вхідну апертуру. Спочатку потік обмежується за рахунок вибору певного значення світлового діаметра об'єктиву D. Одночасно здійснюється спектральна фільтрація потоку

елементами оптичної системи. Далі у відповідності із імпульсною характеристикою об'єктиву формується функція розподілу освітленості $E(\lambda)$ матриці ПЗЗ. Перетворення функції освітленості у сигнал на виході пірметра відбувається через заряд, сформований пікселем матриці, який, в свою чергу, перетвориться у струм на її виході.

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.

Введення в склад оптичної системи світлоподільних елементів дозволяє реалізувати метод мультиспектральної пірметрії (пірметрії 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 пірметр на єдиному перетворювачі, що має безумовні переваги в метрологічному аспекті.

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

При цьому проблема точності вимірювання температури в інформаційно-вимірювальних задачах сьогодні виходить на передній план.

Задачею роботи є обґрунтування методики оцінки похибки біспектрального телевізійного пірметра, яка обумовлена похибкою визначення $E_{\lambda}DX$.

Формування сигналу в методі мультиспектральної пірметрії. Відповідно до схеми рис.1 можна запропонувати такий алгоритм побудови математичної моделі формування інформаційного сигналу в мультиспектральної пірметрії.

Спектральна енергетична світимість тіла при температурі T [5]

$$M(\lambda, T) = \varepsilon \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right), \quad (1)$$

де ε – коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкту;

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{м}^2};$$

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К};$$

λ – довжина хвилі випромінювання, мкм;

Відповідно спектральна освітленість матриці [4]

$$E(\lambda) = \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) \left(\frac{D}{f}\right)^2 M(\lambda, T), \quad (2)$$

де D/f – відносний отвір об'єктиву;

$\tau_c(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання середовища;

$\tau_o(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Отже, сигнал на виході ПП

$$A(\lambda, T) = \varepsilon \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) \left(\frac{D}{f}\right)^2 \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) K, \quad (3)$$

де K – коефіцієнт перетворення ПЗЗ-матриці.

Зауважимо, що ця модель коректна щодо задачі вимірювання температури, якщо в процесі вимірювання не змінюється жоден з параметрів системи.

Отриманий таким чином сигнал, виражений в одиницях струму, напруги чи цифровим кодом може бути використаний для визначення температури поверхні об'єкта контролю методами моноспектральної та мультиспектральної пірометрії.

В основу методу мультиспектральної пірометрії покладена умова про рівність спектральних відношень світимостей реального тіла та АЧТ

$$\frac{M(\lambda_1, T)}{M(\lambda_2, T)} = \frac{M_0(\lambda_1, T_c)}{M_0(\lambda_2, T_c)}, \quad (4)$$

де $M(\lambda_1, T)$ і $M(\lambda_2, T)$ — спектральні світимості тіла для довжин хвиль λ_1 і λ_2 , а $M_0(\lambda_1, T_c)$ і $M_0(\lambda_2, T_c)$ — спектральні світимості АЧТ для довжин хвиль λ_1 і λ_2 при деякій температурі T_c .

Визначення температури тіла забезпечується наступним співвідношенням

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1) \cdot M_0(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2) \cdot M_0(\lambda_2, T)} = \frac{M_0(\lambda_1, T_c)}{M_0(\lambda_2, T_c)}, \quad (5)$$

де $\varepsilon(\lambda_1)$, $\varepsilon(\lambda_2)$ – коефіцієнти випромінювальної здатності для довжин хвиль λ_1 , λ_2 .

Використавши формулу Планка [7], отримуємо з (5)

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right)}{C_2 \left[\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \right]}. \quad (6)$$

Аналіз формули (6) показує, що при $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ маємо $T = T_c$, 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 $T - T_c$ визначиться співвідношенням між $\varepsilon(\lambda_1)$ і $\varepsilon(\lambda_2)$. При $\varepsilon(\lambda_1) > \varepsilon(\lambda_2)$ матимемо $T < T_c$, а при $\varepsilon(\lambda_1) < \varepsilon(\lambda_2)$ $T > T_c$.

Використання поняття ЕкДХ, тобто деякого умовного значення довжини хвилі $\lambda_{ек}$ монохроматичного випромінювання, під дією якого на виході приладу формується такий же сигнал, як і під дією реального випромінювання, дозволяє переписати формулу (6) у наступному виді:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right)}{C_2} \lambda_{ек}, \quad (7)$$

$$\text{де } \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = \lambda_{ек}.$$

Вплив похибки ЕкДХ на похибку вимірювання температури. Формула (7) є математичною базою для реалізації мультиспектральної (в даному випадку біспектральної) телевізійної пірометрії.

Враховавши (3) і (5), сигнал мультиспектрального пірометра можна визначити за наступною формулою

$$A = \frac{A(\lambda_1, T)}{A(\lambda_2, T)} = \frac{\exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right]}{\exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right]} = \exp\left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right] = \exp\left(\frac{C_2}{T} \frac{1}{\lambda_{ек}}\right), \quad (8)$$

Прологарифмувавши (8) отримуємо формулу, яку можна використати для експериментального визначення ЕкДХ біспектрального пірометра

$$\lambda_{ек} = \frac{C_2}{T} \frac{1}{\ln A}. \quad (9)$$

Формулу (7) можна переписати в такий спосіб

$$S = T^2 \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right)}{C_2} \lambda_{ек}, \quad (10)$$

де S – методична похибка вимірювання температури.

Продиференціювавши (10) та перейшовши до скінчених різниць, отримаємо формулу, яка визначає абсолютну похибку вимірювання температури ΔS , обумовлену похибкою визначення ефективної довжини хвилі $\Delta\lambda_{ек}$

$$\Delta S = \frac{T^2}{C_2} \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}\right) \Delta\lambda_{ек} \quad (11)$$

Для оцінки числових значень розглянемо ЕкДХ в діапазоні 0,65...1,05 мкм, який відповідає діапазону характеристик сучасних ТП на ПЗЗ, а при розрахунках використаємо діапазон температур від $T = 1685$ К до $T = 1745$ К, який відповідає технологічним параметрам зонної плавки [3].

На сьогодні вважається, що похибка визначення ЕкДХ не повинна перевищувати 0,1 мкм [5]. Але не важко показати, що у відповідності з (11) та за умови, що $\Delta\lambda_{ек}$ не перевищує 0,1 мкм, абсолютна похибка визначення температури може мати значення понад 10К.

Звідси випливає висновок, що значення довжин хвиль біспектрального пірометра λ_1 і λ_2 необхідно вибрати з врахуванням формули (11). Така процедура дозволить не тільки провести оцінку похибки вимірювання температури, але й вжити заходів щодо зменшення $\Delta\lambda_{ек}$, що, в свою чергу, забезпечить необхідну точність вимірювання температури.

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.

При цьому в діапазоні температур, який відповідає діапазону температур та технологічним параметрам зонної плавки, похибка вимірювання температури може на порядок перевищувати допустиму.

Врахування залежності похибки вимірювання температури від похибки визначення ЕкДХ дозволить не тільки провести оцінку похибки вимірювання температури, але й вжити заходів щодо зменшення похибки визначення ЕкДХ, що, в свою чергу, забезпечить підвищення точності вимірювання температури.

Література

1. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы.— М.:Связь, 1980. 168 С.
2. Порєв В.А. Телевизионная пирометрия // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.—2002.—№ 4.—С.36.
3. Згуровський Г.М., Порєв Г.В. Вимірювання температури зони розплаву в електронно-променевої технології безтигельної зонної плавки // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.— 2003.—№ 3.—С.93.
4. Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. – К.: Наукова думка, 1998. – 178 с.
5. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. –М.: Наука, 1982.
6. Порєв Г.В., Порєв В.А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.— 2001, №.1.— С.56/