

УДК 621.307.13

ФОРМУВАННЯ ВИМІРЮ- ВАЛЬНОГО СИГНАЛУ У БІСПЕКТРАЛЬНІЙ ПІРОМЕТРІЇ

М. О. Маркін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра наукових, аналітичних та
екологічних приладів і систем
Національний технічний університет
України "Київський
політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: M.Markin@kpi.in.ua

В статті проаналізована проблема формування вимірювального сигналу у біспектральній пірометрії. Проведено аналіз існуючих схем формування мультиспектрального сигналу у пірометрії. Запропоновано декілька схем формування сигналу – з використанням багатогранної призми та з використанням тришарові матриці. Розроблена фізична модель формування вимірювального та вихідного сигналів біспектрального пірометра

Ключові слова: вимірювальний сигнал, пірометр, біспектральна пірометрія, ПЗЗ-матриця, телевізійна камера, вимірювання, температура

В статье проанализирована проблема формирования измерительного сигнала в биспектральной пирометрии. Проведен анализ существующих схем формирования мультиспектрального сигнала в пирометрии. Предложено несколько схем формирования сигнала – с использованием многогранной призмы и с использованием трехслойной матрицы. Разработана физическая модель формирования измерительного и выходного сигналов биспектрального пирометра

Ключевые слова: измерительный сигнал, пирометр, биспектральная пирометрия, ПЗС-матрица, телевизионная камера, измерения, температура

1. Вступ

Для отримання матеріалів із заданими властивостями або нових матеріалів використовуються спеціальні високотемпературні технології. Такі технології становляться ефективними лише при дотриманні технологічних вимог, що, в свою чергу, неможливо без відповідних технічних засобів вимірювання. Ці засоби вимірювання повинні надавати належну точність вимірювання та мати потенціал для подальшого покращення характеристик.

Суттєвим обмеженням сфери застосування моноспектральних телевізійних засобів вимірювання (ТЗВ) для контролю температурних режимів є принципова залежність результатів вимірювання від апріорних знань про коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкту та його поведінку в діапазоні вимірювань. Біспектральний пірометр (БСП) в принципі забезпечує потенційно більш високу точність вимірювання, і зрозуміло, що це відкриває нові можливості для підвищення вірогідності контролю температурних режимів, а отже, для підвищення якості продукції, наприклад, в електронно-променевих технологіях отримання нових матеріалів, а також в інших споріднених технологіях [2].

В той же час значна кількість питань біспектральної телевізійної пірометрії, важливих в теоретичному та практичному аспектах, не отримали належного висвітлення.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В літературі відсутні систематизовані дані про технічні засоби біспектральної пірометрії, 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 [3, 4].

Зокрема, відсутні роботи, які б висвітлювали таке важливе питання телевізійної пірометрії як еквівалентна довжина хвилі біспектрального телевізійного пірометра, яка є надзвичайно важливою характеристикою і широко використовується в роботах, присвячених теорії та практиці пірометрії. Більше того, навіть поняття еквівалентної довжини хвилі біспектрального телевізійного пірометра є недостатньо визначеним, відсутні також методики та результати відповідних експериментальних досліджень, що може привести до помилок в оцінці перспектив або результатів використання біспектральних телевізійних пірометрів.

Отже, на сьогодні проблема полягає не стільки в забезпеченні мультиспектрального контролю високотемпературних технологій за допомогою телевізійних засобів, скільки в аналізі та вирішенні нових проблем, які при цьому виникають.

Це означає, що фактично сьогодні не створена потенційно найбільш ефективна методологія контролю температури, можливості якої повністю б відповідали потребам електронно-променевих технологій отримання нових матеріалів, технологіям лазерної обробки, зварювання та іншим спорідненим технологіям.

В [5] показано, що істотне підвищення ефективності телевізійної пірометрії (ТП) можливе, зокрема, на шляху вдосконалення методології їх застосування та за рахунок підвищення точності визначення тих характеристик, які не паспортуються виробниками

телевізійних камер, але є важливими з точки зору їх використання як засобів вимірювання.

Зрозуміло також, що без дослідження питань, пов'язаних з формуванням похибок вимірювання температури, зокрема, без дослідження впливу еквівалентної довжини хвилі на точність БСП, подальший розвиток біспектральної телевізійної пірометрії неможливий.

3. Формування вимірювального сигналу в біспектральній пірометрії

Аналіз процесів формування вимірювального сигналу в біспектральній пірометрії почнемо із розгляду схем формування вимірювального сигналу.

Зараз можна класифікувати телевізійні пірометри на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) у дві групи. Першу групу складають найбільш поширені на сьогодні яскравісні (моноспектральні) ТП, оптична схема яких складається з об'єктиву та світло-електричного перетворювача (СЕП).

До другої групи відносяться мультиспектральні телевізійні пірометри, або, як їх ще називають, пірометри спектрального відношення. Структурна схема кожного з приладів другої групи складається з об'єктиву, світлоподільних елементів та СЕП. При цьому в кожній групі можуть використовуватися однакові об'єктиви та СЕП, а світлоподільні елементи є принципово відмінністю.

На рис. 1 представлено загальну структуру оптичної системи ТП другої групи.

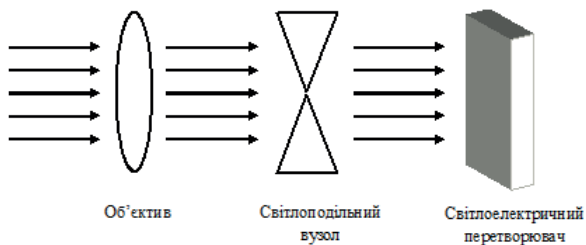


Рис. 1. Загальна структура оптичної системи мультиспектральних пірометрів

Розглянемо схеми формування сигналу, які можуть застосовуватись в мультиспектральній ТП.

На рис. 2 представлено схему формування сигналу з використанням світлофільтрів, напханих на матрицю. Ця схема до цього часу широко використовується в кольоровому телебаченні. Результат представляє собою фільтр Баєра [6].

Випромінювання від об'єкту проходить крізь лінзу та потрапляє на один із світлофільтрів. Крізь світлофільтр проходить випромінювання тільки певного спектру, яке далі потрапляє на ПЗЗ-матрицю. Головним недоліком такої схеми є зниження роздільної здатності системи в порівнянні з системою з чорно-білою матрицею.

При розробці мультиспектрального ТП нами досліджувалось питання про можливість використання інших схем формування вимірювального сигналу.

Один із можливих варіантів представлений на рис. 3. Це схема формування сигналу з багатогранною

призмою. Випромінювання від об'єкту 1 потрапляє на одну з граней багатогранної призми 2, яка відбиває випромінювання певного спектру. Надалі відбите випромінювання потрапляє до приймача сигналу 4, де формується вимірювальний сигнал.

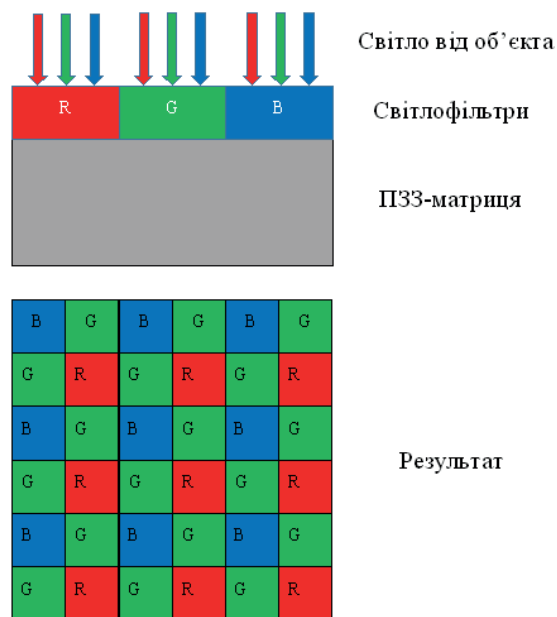


Рис. 2. Схема формування сигналу з використанням світлофільтрів

При обертанні призми навколо вісі обертального предметного стола 3, в деякі моменти часу випромінювання від об'єкту, відбите від певної грані призми буде потрапляти до приймача сигналу 4. Кожна грань призми відбиває випромінювання тільки заданого спектру. Так формується вимірювальний сигнал на різних довжинах хвилі.

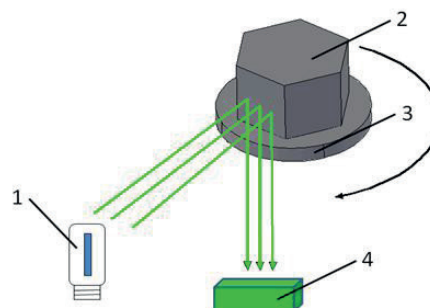


Рис. 3. Схема формування сигналу з використанням багатогранної призми: 1 — об'єкт; 2 — багатогранна призма; 3 — обертальний предметний стіл; 4 — приймач сигналу

На основі цієї схеми нами розроблений пристрій формування вимірювального сигналу та отримано патент України на корисну модель.

Переваги схеми — можливість поділу сигналу на велику кількість спектрів, яка залежить від кількості граней призми.

Недоліки схеми – ускладнена оптична система та значна вартість виробництва багатогранної призми; потреба у використанні додаткового пристрою для обертання призми.

4. Використання тришарової матриці в схемах формування вимірювального сигналу

Останнім часом однією з перспективних схем формування відеосигналу в телевізійній техніці вважається схема з використанням так званих тришарових матриць [7, 8]. На рис. 4 представлено принцип дії тришарової матриці, кожен піксель якої здатний сприймати одразу три кольорові складові.

В матриці використовується квантовий ефект – світло з різною довжиною хвилі поглинається на різній глибині напівпровідника [5]. Синя частина спектра поглинається верхнім шаром (товщина 0.2 мкм), зелена середнім (товщина 0.4 мкм) і червона нижнім (більше 2 мкм). Товщина кожного шару обрана за результатами експериментальних досліджень по глибині проникнення квантів відповідного спектрального діапазону в кремній. Шари, у яких відбувається фотоефект, розділені додатковими тонкими зонами низьколегованого кремнію і мають окремі виводи сигналу.

У світлочутливій матриці кожен елемент (приймач сигналу) генерує електричний струм пропорційний кількості фотонів, що викликали фотоефект, за час експозиції.

Аналоговий сигнал предметної точки, що складається зі складових світла RGB, фіксується один під одним в одному фотодіоді в порядку: синій, зелений, червоний. Однак, на відміну від фотоплівки для одержання вихідного одного сигналу на основі адитивного синтезу кольору застосовуються складне аналого-цифрове перетворення (АЦП). При цьому аналогові складові сигнали кожного шару перетворюються в один вихідний сигнал.

Аналоговий сигнал предметної точки у фотодатчиках проходить шлях перетворень перед виходом його в карту пам'яті фотоапарата у вигляді готового файлу або при зйомці в системі RAW. Спочатку на етапі фіксації його у фотодіоді ми одержуємо його дійсне значення у вигляді аналогового сигналу чорно-білого зображення. Далі, у результаті АЦП або інших систем перетворень відбувається дискретизація сигналів, модуляція їх і оцифровка. При цьому використовується система відновлення дискретного сигналу в аналоговий сигнал електронними системами квантування і дискретно-аналогового відновлення [7].

Таким чином, трірівневі приймачі сигналу RGB (піксели) на відміну від одношарових приймачів сигналу утворюють комірку RGB в одному фоточутливому елементі замість трьох [8].

Основною перевагою такої схеми формування вимірювального сигналу є висока роздільна здатність, а також відсутність таких елементів оптичної системи як світлофільтри, білінзи чи призми, які ускладнюють схему та вносять похибки у вимірювання.

Недоліки – відносно високий рівень цифрового шуму, що пояснюється впливом верхніх шарів кремнію на червоний і зелений шари фотодіода. Варто враховувати, що на ці детектори світло попадає, про-

йшовши шари верхніх сенсорів, і вимірюваний сигнал складається частково з комбінації сигналів від всіх кольорів, у результаті в кожному рівні він формує сигнал трохи перевернутий. RGB складові кольору в цілому аналогові складові сигналів. Однак, у міру вдосконалення можливостей тришарових матриць уже майже вирішена система формування сигналу предметної точки в границях одного тришарового пікселя [9].

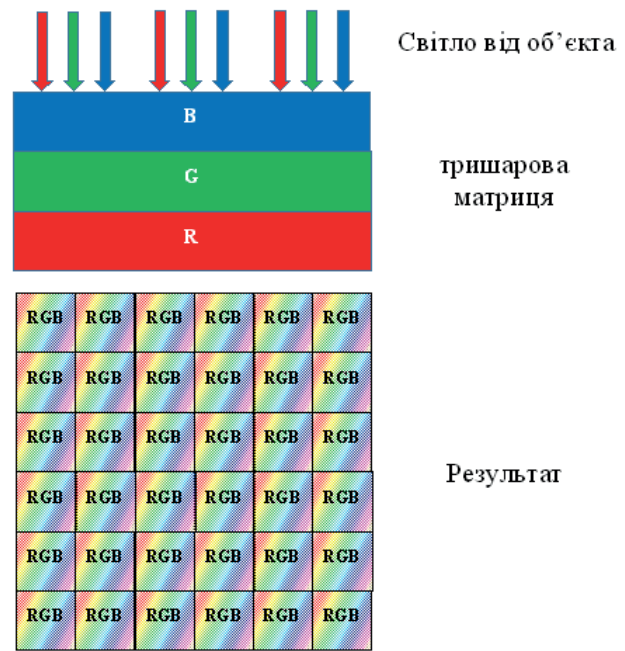


Рис. 4. Принцип дії тришарової матриці

Отже, враховуючи згадані вище властивості тришарової матриці перспективним виглядає її використання в схемах формування вимірювального сигналу в мультиспектральній пірометрії.

5. Фізична модель формування вимірювального сигналу

За основну кількісну характеристику оптичного поля, утвореного потоком випромінювання від об'єкту в спектральному діапазоні $\lambda \dots \lambda + \Delta\lambda$, приймемо спектральну яскравість $L(\Delta\lambda, T)$. Отже, вхідним сигналом для ТП, який несе інформацію про структуру, властивості та стан об'єкту контролю, є яскравість поверхні (спектральна яскравість).

Фізично робота ТП полягає в послідовності перетворень потоку випромінювання, яке попадає у вхідну апертуру. Кінцевою ланкою цієї послідовності перетворень є цифровий сигнал, пропорційний значенню вхідного сигналу [10].

Метод біспектральної пірометрії відрізняється від моноспектрального тим, що спектральна освітленість матриці формується у двох спектральних діапазонах, тобто ми отримуємо на виході пірометричний сигнал на різних довжинах хвилі, за рахунок чого можемо уникнути похибок, пов'язаних з визначенням коефіцієнту випромінювальної здатності, отже, підвищити точність вимірювання температури.

На рис. 5 представлена фізична модель формування вимірювального сигналу в біспектральній пірометрії.

Світловий потік від об'єкту з деяким коефіцієнтом випромінювальної здатності $\varepsilon(\lambda_i)$ ослабляється навколишнім середовищем з коефіцієнтом пропускання $\tau_c(\lambda_i)$, після чого потрапляє до об'єктива із певним значенням відносного отвору D/f' . У схемі формування зображення потік від об'єкта розділяється на спектральні складові та формуються функції розподілу спектральної освітленості матриці $E(\lambda_1)$ і $E(\lambda_2)$. Надалі функція освітленості матриці у кожному з каналів послідовно перетворюється у масив зарядів пікселів і формуються сигнали каналів $A(\lambda_1)$ та $A(\lambda_2)$.

Остаточно вихідний пірометричний сигнал у методі біспектральної пірометрії отримується діленням сигналів окремих каналів

$$A = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)}. \quad (1)$$

За фізичною моделлю формування вхідного та вихідного сигналів побудуємо математичну модель.

Для визначення енергетичної світимості на першому етапі скористаємося наближеною формулою Планка

(за умови, що $\exp \frac{C_2}{\lambda T} \gg 1$)

$$M(\lambda_i, T) = \varepsilon(\lambda_i, T) \frac{C_1}{\lambda_i^5} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_i T} \right). \quad (2)$$

Врахувавши спектральний коефіцієнт пропускання середовища $\tau_c(\lambda_i)$, спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи $\tau_o(\lambda_i)$, отримаємо, що спектральна освітленість СЕП (для параксiального пучка) визначається

$$E(\lambda_i) = \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda_i) \tau_o(\lambda_i) \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \varepsilon(\lambda_i, T) \frac{C_1}{\lambda_i^5} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_i T} \right), \quad (3)$$

де $\left(\frac{D}{f'} \right)$ – відносний отвір об'єктива оптичної системи.

Таким чином сигнал на виході

$$A = \frac{kR}{t_k} \varepsilon(\lambda_i, T) \frac{C_1}{\lambda_i^5} \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda_i) \tau_o(\lambda_i) \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_i T} \right), \quad (4)$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

R – опір у комірці;

t_k – час комутації.

Ця формула визначає вимірювальний сигнал, сформований на довжині хвилі λ_i .

Якщо в межах одного експерименту зовнішні умови та параметри ТП незмінні, то можна ввести постійну

$$B = \frac{kR}{t_k} \frac{C_1}{\lambda_i^5} \frac{\pi}{4} \tau_c(\lambda_i) \tau_o(\lambda_i) \left(\frac{D}{f'} \right)^2. \quad (5)$$

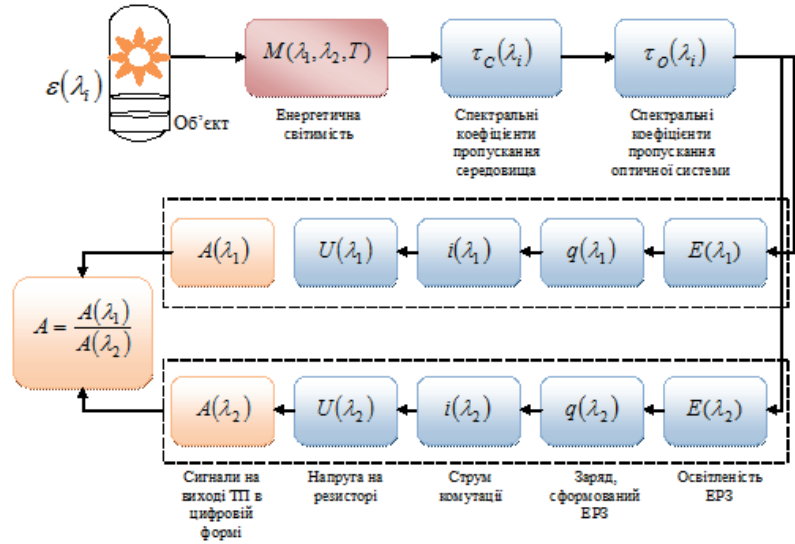


Рис. 5. Фізична модель формування вхідного та вихідного сигналів в біспектральній пірометрії

Тоді формула (4) з урахуванням (5) матиме вигляд

$$A = B \varepsilon(\lambda_i, T) \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_i T} \right). \quad (6)$$

Оскільки вимірювання виконується одразу у двох спектральних діапазонах, а пірометричний сигнал є часткою пірометричних сигналів на різних довжинах хвилі, то отримаємо

$$\begin{aligned} A &= \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} = \frac{B \varepsilon(\lambda_1, T) \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T} \right)}{B \varepsilon(\lambda_2, T) \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T} \right)} = \\ &= \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \exp \left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] = \\ &= \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_{\text{ек}}, T)} \exp \left[\frac{C_2}{T} \frac{1}{\lambda} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

де $\lambda_{\text{ек}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ – еквівалентна довжина хвилі БСП.

Прологарифмувавши отримаємо формулу

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

Якщо $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$, то метод біспектральної пірометрії дозволить значно підвищити точність вимірювання завдяки використанню тришарової матриці та виключенню можливої неоднозначності коефіцієнту випромінювальної здатності для різних довжин хвилі

Але в деяких випадках не дає можливості позбутися похибок, обумовлених похибками визначення коефіцієнту випромінювальної здатності, оскільки на

різних довжинах хвилі навіть для одного і того ж матеріалу він може мати різні значення.

Таким чином, можна зробити висновок про необхідність дослідження впливу змін коефіцієнту випромінювальної здатності, в тому числі і малих, на похибку вимірювання температури.

6. Висновки

1. Проведено дослідження відомих схем формування мультиспектрального сигналу, на основі якого показано можливість використання тришарової

матриці при формуванні вимірювального сигналу в біспектральній пірометрії.

2. Обґрунтовано перспективність використання тришарової матриці в схемах формування вимірювального сигналу в мультиспектральній пірометрії.

3. Розроблена фізична модель формування вимірювального та вихідного сигналів БСП.

4. Зроблено висновок про необхідність подальшого дослідження характеристик біспектральних телевізійних засобів вимірювання, а також впливу малих змін коефіцієнту випромінювальної здатності на похибку вимірювання температури.

Література

1. Порев, Г. В. Підвищення точності телевізійних засобів вимірювання температури поверхні зони плавки [Текст] / Г. В. Порев // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 9. – С. 39-41.
2. Згуровський, Г. М. Вимірювання температури зони розплаву в електронно-променевої технології безтигельної зонної плавки [Текст] / Г. М. Згуровський, Г. В. Порев // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – № 3. – С. 93-97.
3. Порев, В. А. Телевізійна пірометрія [Текст] / В. А. Порев. – К. : АБЕРС, 2002. – 196 с.
4. Hauer, W., & Zauner, G. (2013, March). High-temperature dual-band thermal imaging by means of high-speed CMOS camera system. In IS&T/SPIE Electronic Imaging (pp. 866103-866103). International Society for Optics and Photonics.
5. Estevadeordal, J., Tralshawala, N., & Badami, V. (2013, July). Multi-Color Imaging Pyrometry Techniques for Gas Turbine Engine Applications. In ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting (pp. V002T11A007-V002T11A007). American Society of Mechanical Engineers.
6. US Patent № US3971065 (A) — 1976-07-20. Color imaging array / Bryce E. Bayer, Mar. 05, 1975.
7. Direct Image Sensors [Електронний ресурс] : Foveon. – Режим доступу : <http://www.foveon.com/>.
8. Foveon X3-матриця [Електронний ресурс] : Матеріал із свободної русскої енциклопедії «Традиція». – Режим доступу: http://traditio.ru/wiki/Foveon_X3-матриця.
9. Foveon X3 [Електронний ресурс] : Матеріал із Вікіпедії — свободної енциклопедії. – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3.
10. Маркін, М. О. Біспектральний телевізійний прилад контролю високотемпературних технологій [Текст] / М. О. Маркін, В. А. Порев // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 23. – С. 102-105.