

Н. Є. Гоц, канд. техн. наук, доц.;
Т. Пянтковські, канд. техн. наук, доц.

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ПРИЙМАЧІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ПІРОМЕТРІЇ

Розглянуто параметри сучасних приймачів інфрачервоного випромінювання, що використовуються в пірометрії, сформульовані основні критерії їх вибору для реалізації багатоканальних методів вимірювання температури за випромінюванням.

Вступ

В останні роки розширилося застосування пірометрів випромінювання в різних галузях промисловості — поруч з металургією, електроенергетикою, комунальному та сільському господарстві, вони використовуються в медицині, автотранспорті, нанотехнологіях та ін. Одним з чинників цього є значне покращення їх метрологічних характеристик, зростання точності та швидкодії вимірювання, зручності використання й обслуговування, низькі ціни.

Ключовим елементом пірометрів є приймач випромінювання (ПВ), який перетворює енергію електромагнітного випромінювання досліджуваного об'єкта в електричний сигнал. Зростання виробництва пірометрів в останні роки зумовлено, в першу чергу, використанням гібридних та MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems) технологій при виробництві приймачів інфрачервоного випромінювання. Гібридні технології дозволяють поєднувати кремнієві компоненти, котрі служать для перетворення електричного сигналу, з іншими матеріалами, які використовуються для приймання випромінювання. MEMS-технології дозволяють виробляти приймачі випромінювання об'ємної структури, що значно покращує їх метрологічні характеристики. Незалежно від практичної реалізації одноканального чи багатоканального пірометра вихідний сигнал відповідного каналу може бути описаний формулою

$$S_i = q_i \left\{ \int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} \frac{\varepsilon(\lambda) \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \tau_{Fi}(\lambda) \cdot R_i(\lambda) \cdot C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda + \int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} [1 - \varepsilon(\lambda)] \frac{\tau_A(\lambda) \cdot \tau_{Fi}(\lambda) \cdot R_i(\lambda) \cdot C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_A}\right) - 1 \right]} d\lambda \right\} + S_{Di}(T_P) + S_{Ni}, \quad (1)$$

де i — номер спектрального каналу пірометра; q_i — стала, що залежить від конструкції пірометра, зокрема від параметрів оптичної системи, електронного тракту та чутливості приймача випромінювання; $\varepsilon(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта; $\tau_A(\lambda)$ — коефіцієнт пропускання атмосфери; $\tau_{Fi}(\lambda)$ — коефіцієнт пропускання оптичного фільтра; $R_i(\lambda)$ — спектральна чутливість приймача випромінювання та оптичної системи; $S_{Di}(T_P)$ — сигнал, пропорційний власному випромінюванню приладу; S_N — сигнал пропорційний значенню шумів приймача випромінювання та електронного тракту; T_A , T_P , T — відповідно, температура навколишнього середовища, пірометра та об'єкта.

Огляд приймачів випромінювання

Для вимірювання температури об'єктів за випромінюванням використовуються два типи ПВ — теплові та фотоелектричні, різні види яких показані в табл. 1 [1, 2].

Приймачі випромінювання, що використовуються в пірометрах

Види ПВ		Хімічний склад ПВ
Теплові	Термобатарей	Bi-Sb, Si-Al
	Піроелектричні	LiTa, PbZT
Фото-електричні	Фотодіод	Si
	Фотодіод	InGaAs, InAs
	Фотодіод	Ge
	Фотопровідник	PbS, PbSe
	Фоторезистор	HgCdTe

Теплові приймачі випромінювання. Принцип дії теплових приймачів випромінювання базується на використанні термічного ефекту — оптичне випромінювання, що сприймається ПВ, спричинює підвищення його температури або зміну електричних параметрів (опору, провідності, ємності). Це є найстаріша група ПВ, які вже виготовляються й на основі нанотехнологій. Матриці цих приймачів випромінювання на основі MEMS-технологій дозволяють забезпечити властивості, які недосяжні для напівпровідникових ПВ. Особливістю їх є і те, що вони працюють при кімнатній температурі без охолодження. На практиці в пірометрії широко використовуються термобатарей на основі MEMS-технологій та піроелектричні ПВ. Основними характеристиками термоелектричних приймачів випромінювання є такі: неселективність — чутливість слабо залежить від довжини хвилі у всьому інфрачервоному діапазоні випромінювання від 0,75...1000 мкм; працюють при кімнатних температурах і не потребують охолодження в робочому режимі; мають можливість вимірювання низьких від -50 °C та високих до 1200 °C температур. Суттєвими недоліками теплових ПВ є: невисока швидкодія порядку 10^{-3} ... 10^{-1} с; низька чутливість; необхідність наявності інформації про температуру «холодних кінців» термопар.

Фотоелектричні приймачі випромінювання. Принцип дії фотоелектричних приймачів випромінювання заснований на ефекті поглинання фотоелементом енергії випромінювання внаслідок зовнішнього фотоелектричного ефекту або зміни провідності в результаті фотоэффекту (внутрішнього, зовнішнього, вентильного, подовжнього або бічного). Крім широко використовуваних ПВ на основі кремнієвих фотодіодів, щораз частіше застосовують приймачі випромінювання на основі InGaAs, InAs та фотопровідників, зокрема на основі PBS і PbSe. З метою розширення робочого спектрального діапазону ПВ застосовуються структури, складені з двох або трьох елементів приймачів. Часом ці приймачі називають двокольоровими або двоканальними. Оскільки ПВ цього виду є достатньо дорогими, то вони використовуються переважно для лабораторних приладів та наукових досліджень. В промислових пірометрах використовуються приймачі випромінювання, подані в табл. 1. Взагалі, властивості фотоелектричних ПВ можна охарактеризувати таким чином: висока швидкодія; висока чутливість; висока виявна здатність. Основним недоліком використання фотоелектричних ПВ є те, що вони потребують охолодження в робочому режимі експлуатації. Вибір ПВ для пірометром здійснюється за його метрологічними характеристиками, основні з яких подані в табл. 2, де наведені також граничні значення параметрів приймачів розглянутих видів.

Таблиця 2

Основні параметри приймачів випромінювання та пірометрів

Вид ПВ	Характеристики приймачів випромінювання				Характеристика пірометра
	Спектральний діапазон [мкм]	NEP [Вт/Гц]	D^* [см Гц ^{1/2} /Вт]	Швидкодія, [мс]	Діапазон температур [°C]
Si	0,4...1,0	$8,010^{-14}$ 1 мм ²	*	$<1 \cdot 10^{-4}$	600...3000
InGaAs	0,9...1,7	$(2,710^{-13}$ 0,1 мм ²)	$5 \cdot 10^{12}$	0,001	400...1800
PBS	2,0...3,6	*	$1,0 \cdot 10^9$	10	100...1400
PbSe	2,5...5,6	*	$1,0 \cdot 10^8$	1	200...1400
InAs	1,5...3,5	*	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	200...1000
Термобатарей	0,75...14	*	$6,0 \cdot 10^8$	100	-50...1200
Піроелектричні	0,75...14	*	$2,0 \cdot 10^8$	1000	-50...1200

Вибір приймача випромінювання для одноканального пірометра завжди здійснювався в залежності від таких метрологічних характеристик, як температурний діапазон вимірювання та виявна здатність D^* . На сьогоднішній день в пірометрії широко впроваджуються багатоканальні методи,

які дозволяють значно підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням. Реалізується це при одночасних вимірюваннях в декількох спектральних каналах та обробці вихідного сигналу ПВ за відповідним алгоритмом [4]. Вибір ПВ для багатоканального пірометра вже не може базуватися лише на описаних характеристиках. Тому актуальним є формулювання критеріїв вибору приймачів випромінювання для багатоканального термометра. Основними вимогами для вибору сучасних приймачів випромінювання є такі: можливість реалізації декількох спектральних каналів та методів пірометрії; високі значення відношення сигналу до шуму; відсутність охолодження приймача випромінювання.

Формулювання критеріїв вибору приймачів випромінювання для багатоканальної пірометрії

Авторами запропоновано такі критерії вибору приймачів випромінювання для реалізації багатоканальних методів вимірювання температури за випромінюванням:

Критерії вибору робочого температурного діапазону. Термометрія за випромінюванням останнім часом досягла значного прогресу. Це стосується розширення робочого температурного діапазону як в область високих температур понад 2500 °С так і у область середніх і низьких температур до -50 °С. Згідно з вказаним температурним діапазоном вибирається робочий спектральний діапазон приймача випромінювання залежно від двох основних критеріїв:

— спектральної області знаходження максимуму випромінювання досліджуваного об'єкта згідно з законом зсуву Вина;

— розташування основних вікон спектральної прозорості атмосфери — 0,7...2, 5...3, 8...14 мкм.

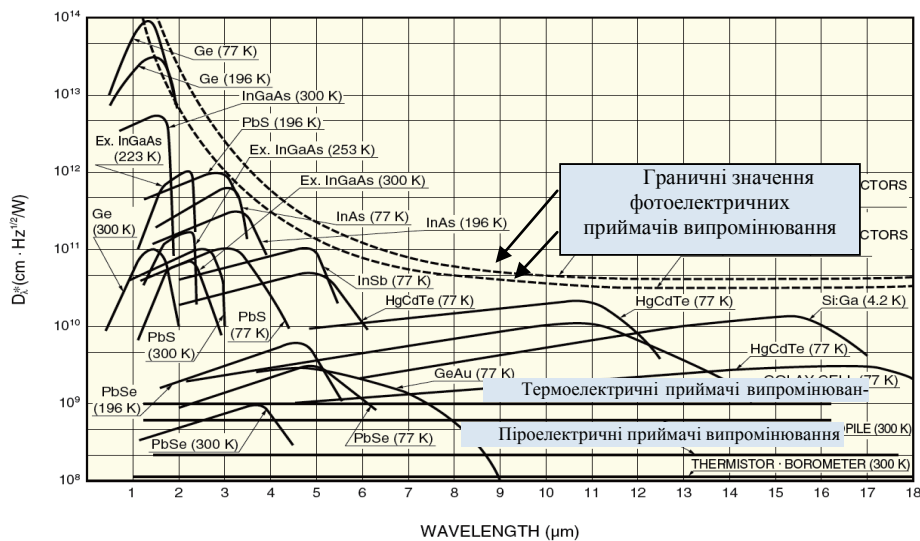
Згідно з цими критеріями виділяються такі робочі діапазони температур і відповідні їм спектральні діапазони, згідно з якими вибирається тип приймача випромінювання (табл. 3).

Таблиця 3

Відповідність між температурними і спектральними діапазонами ПВ пірометрів

Температурна область	Діапазон температур [°С]	Діапазон довжин хвиль, [мкм]
Область низьких температур	-50...300	8,0...14,0
Область середніх температур	300...800	3,0...5,0
Область високих температур	800...2500	0,7...2,0
Повний робочий діапазон температур	-50...1200	8,0...14,0

Наступним важливим критерієм вибору є максимально необхідне значення спектральної виявної здатності D^* для робочої спектральної області. На рисунку показані спектральні чутливості різних видів детекторів.



Залежність чутливості різних видів приймачів випромінювання від довжини хвилі [3]

Факторами, які впливають на вибір приймача є такі:

- місцезнаходження максимуму спектральної чутливості;
- лінійність спектральної чутливості у використуваному спектральному інтервалі.

Як видно з рисунка спектральна чутливість теплових ПВ є лінійною і має сталі значення у всьому спектральному діапазоні, що зумовлює можливість їх використання як для вимірювання як низьких температур $-50...300\text{ }^\circ\text{C}$, так і високих $300...2500\text{ }^\circ\text{C}$. Проте значення виявної здатності не перевищує $10^9\text{ смГц}^{1/2}/\text{Вт}$. Чутливість фотоелектричних ПВ є селективна та лінійна лише на деякій певній ділянці, спектральна характеристика має чітко виражений максимум або мінімум. Спектральна чутливість фотоелектричних ПВ залежить від їх електронної структури. Випромінювання, що сприймається приймачем, взаємодіє з атомами як основного матеріалу, так і домішок. Сама структура приймача випромінювання накладає обмеження на границі робочого спектрального діапазону. Це враховано в формулі (1) введенням показника $R(\lambda)$, значення якого залежить і від спектрального діапазону оптичної системи пірометра. За умови обмеження спектральних каналів пірометра інтерференційними оптичними фільтрами шириною до 100 мкм і менше спектральну чутливість ПВ можна вважати сталою величиною, що дорівнює середньому значенню довжин хвиль в цьому спектральному інтервалі. Значення виявної здатності фотоелектричних ПВ може досягати 10^{14} в близькій інфрачервоній області спектра, що зумовлює переважне їх використання для вимірювання високих температур в області $300\text{ }^\circ\text{C}...2500\text{ }^\circ\text{C}$. Для забезпечення високого значення виявної здатності при низькотемпературних вимірюваннях має застосовуватися охолодження ПВ, що зумовлює конструктивну громіздкість.

Критерії вибору розташування робочих спектральних каналів. Наступною вимогою для вибору ПВ або набору ПВ може служити можливість реалізації багатоканального методу пірометрії, для чого необхідна можливість виділення декількох окремих спектральних інтервалів або можливість вибору за наявності їх надлишковості. Місце розташування спектральних n каналів має задовольняти одну з умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1(\lambda_{1ef}, T) < b_2(\lambda_{2ef}, T) < \dots < b_n(\lambda_{nef}, T); \\ \frac{b(\Delta\lambda_n, T_1)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_1)} < \frac{b(\Delta\lambda_n, T_2)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_2)} < \dots < \frac{b(\Delta\lambda_n, T_k)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_k)} \end{array} \right. \quad (2)$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1(\lambda_{1ef}, T) > b_2(\lambda_{2ef}, T) > \dots > b_n(\lambda_{nef}, T); \\ \frac{b(\Delta\lambda_n, T_1)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_1)} > \frac{b(\Delta\lambda_n, T_2)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_2)} > \dots > \frac{b(\Delta\lambda_n, T_k)}{b(\Delta\lambda_{n+1}, T_k)}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Критерій вибору ефективних довжин хвиль спектральних каналів приймача випромінювання. ПВ повинен забезпечувати можливість вибору еквівалентної довжини хвилі, оптимальної для даного методу пірометрії. В результаті огляду різних методів і аналізу формул визначення термодинамічної температури різними методами пірометрії сформульований узагальнений вираз визначення умовної і термодинамічної температури різними методами монохроматичної пірометрії [4].

$$T = \frac{T_{\text{ум}} C_2}{C_2 - k_i T_{\text{ум}} \Lambda_{\text{ек}} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(\varepsilon_i))}; \quad (4)$$

$$\lim \left[k_i \Lambda_{\text{ум}} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(\varepsilon_i)) \right] \longrightarrow \min, \quad (5)$$

де — a_i і b_i коефіцієнти, які залежать від методу монохроматичної пірометрії; i — кількість робочих спектральних каналів пірометра; $\Lambda_{\text{ек}}$ — еквівалентна довжина хвилі відповідного методу монохроматичної пірометрії; $k_i = \pm 1$ залежно від використаного методу пірометрії; $T_{\text{ум}}$ — умовна температура відповідного методу пірометрії; S_i — узагальнений сигнал приймача випромінювання; ε_i — узагальнений коефіцієнт випромінювання відповідного методу пірометрії.

Згідно з (4), для зменшення значення похибки визначення температури методами пірометрії, критерієм вибору значень робочих ефективних довжин хвиль спектральних каналів детектора є мінімальне значення виразу (5), що зумовлює вимоги до взаємного розташування по спектру ро-

бочих спектральних каналів приймача випромінювання. У різних методах пірометрії по-різному визначається відповідне значення еквівалентної довжини хвилі, яке залежить від співвідношення між ефективними довжинами хвиль використовуваних спектральних каналів. Приклади визначення еквівалентних довжин хвиль різних методів пірометрії залежно від значень ефективних довжин хвиль спектральних діапазонів подані в таблиці 4.

Таблиця 4

Еквівалентні довжини хвиль різних методів багатоканальної пірометрії [5, 6, 7]

Назва методу монохроматичної багатоканальної каналної пірометрії	Формула еквівалентної довжини хвилі $\Lambda_{\text{ум}}$
Метод визначення кольорової температури	$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$
Взаємо-кореляційний метод визначення температури	$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1}$
Степеновий метод визначення температур	$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$
Метод подвійного спектрального відношення інтенсивностей випромінювання в трьох рівновіддалених по шкалі довжин хвиль спектральних інтервалах	$\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2\Delta\lambda^2}$
Метод подвійного спектрального відношення за трьома інтенсивностями випромінювання з довільним розташуванням спектральних інтервалів	$\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)}$
Універсальний метод подвійного спектрального відношення	$\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4}{\lambda_3 \lambda_4 (\lambda_2 - \lambda_1) - \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_4 - \lambda_3)}$

Згідно з табл. 4, на вибір приймача впливає можливість реалізації рознесення або зближення значень ефективних довжин хвиль робочих спектральних інтервалів (залежно від методу пірометрії) з метою зменшення значення еквівалентної довжини хвилі методу пірометрії. Рознесення ефективних довжин хвиль спектральних каналів приймача приводить до збільшення відмінностей між значеннями використовуваних спектральних коефіцієнтів випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта, що негативно впливає на точність вимірювання температури. Тому оптимальний вибір ефективних довжин хвиль при максимальних значеннях коефіцієнта випромінювання об'єкту має бути реалізований паралельно з дослідженням випромінювальних властивостей поверхні.

Критерій вибору відношення сигнал/шум для заданого значення похибки вимірювання температури. Методи пірометрії базуються переважно на монохроматичних співвідношеннях згідно з законом Віна, а практично реалізуються в процесі вимірювання потоку випромінювання в певних спектральних інтервалах. У дальній інфрачервоної області використовується весь спектральний інтервал 8...14 мкм, а в ближній — окремі спектральні інтервали на ділянках, подані в таблиці 2. Критеріями вибору ПВ залежно від можливості реалізації мінімальної ширини спектрального інтервалу і вимірювання низьких температур служать: максимальне значення чутливості ПВ; максимального співвідношення сигналу до сигналу шуму; мінімальне значення похибки вимірювання температури в залежності від рівня шумів. При виділенні вузьких спектральних інтервалів на точність вимірювання температури значний вплив можуть мати шуми, обумовлені фізичними процесами, що відбуваються в ПВ, оскільки їх значення стають співмірні із корисним сигналом. Наявність шумів утруднює виявлення слабких сигналів низькотемпературних джерел випромінювання, а також приводить до похибки вимірювання параметрів сигналу: амплітуди, частоти, фази, часу появи імпульсів випромінювання. Взаємозалежність шуму ПВ та похибки вимірювання температури багатоканальним пірометром визначається так:

$$\Delta T = \frac{C_2}{\Lambda} \frac{1}{\left\{ \ln(U_1) + \left[\sum_{i=2}^n 2(-1)^{i-1} \ln(U_i) \right] + (-1)^{n-1} \ln(U_n) + B_n \right\}^2} \times \left[\frac{1}{U_1} + \left(\sum_{i=2}^{m-1} (-1)^{i-1} \frac{2}{U_i} \right) + \frac{(-1)^{m-1}}{U_m} \right] U_N, \quad (6)$$

де B_n — стала для n каналів; $B_n = f(q_1, q_2, q_n, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_n)$.

Це дає можливість в залежності від заданої похибки та нижньої границі вимірювання темпера-

тури оброти ПВ з певним значенням напруги шумів.

Висновки

На основі сформульованих в статті критеріїв можна вибрати приймач випромінювання для практичної реалізації багатоканальних термометрів випромінювання.

Застосування багатоканальних методів вимірювання температури у термометрії випромінювання дозволяє підвищити точність вимірювань та розширити сфери застосування пірометрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khan M. A. Noncontact temperature measurement / M. A. Khan, C. Allemand, T. W. Eagar // I Interpolation based techniques, Review of Scientific Instruments. — 1991. — Vol. 62, No. 2. — P. 392—402.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : наук.-навч. вид. В 3 томах. Том 3. Книга 1 / [В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра та інші]; за редакцією З. Ю. Готри. — Львів : Ліґа-Прес, 2007. — 249 с.
3. Technical information SD-12. Characteristics and use infrared detectors. [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.slac.stanford.edu/grp/arb/tn/arbvol5/AARD460.pdf>.
4. Гоц Н. Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии / Н. Е. Гоц // Приборы +Автоматика. — 2007. — С. 35—50. — Обнинск, Россия.
5. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В. Н. Снопко. — Минск : Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. — 224 с.
6. Pyatt E. C. Some consideration of the errors of brightness and two-colour types of spectral radiation pyrometer / Pyatt E. C. // Brit. J. Appl. Phts. — 1954. — V. 5. — P. 264—268.
7. Жугалло О. М. Метод пирометрии двойного спектрального отношения / О. М. Жугалло // Теплофизика высоких температур. — 1972. — Т. 10, № 3. — С. 622—628.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 22.04.11
Рекомендована до друку 05.09.11

Гоц Наталія Євгенівна — доцент кафедри метрології, стандартизації і сертифікації.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів;

Пянтковскі Тадеуш — доцент кафедри інфрачервоної техніки та термовізії.

Військова технічна академія, Інститут оптоелектроніки, Варшава