

УДК 681.35

С.П. Колачов, В.В. Кузавков

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

## ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО СПОСОБУ ЗНЯТТЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В МЕТОДІ ВЛАСНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті розглядаються основні характеристики технічних засобів дистанційної реєстрації температури, можливість їхнього використання для безконтактного способу зняття діагностичної інформації в методі власного випромінювання.

**Ключові слова:** засоби дистанційної реєстрації температури, діагностична інформація, метод власного випромінювання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розвиток електроніки та обчислювальної техніки виявився передумовою для широкої автоматизації найрізноманітніших процесів у промисловості та наукових дослідженнях. Реалізація цієї передумови значною мірою визначалася можливостями пристроїв для одержання інформації про регульований параметр або процес, тобто можливостями датчиків. Датчики перетворюють вимірювальний параметр у вихідний сигнал, який можна виміряти та оцінити кількісно, є «органами почуттів» сучасної техніки.

**Аналіз літератури.** серед широкої розмаїтості вимірювальних параметрів одним з основних є температура. Її вимір необхідно проводити у всіх складних технологічних процесах. Велика розмаїтість датчиків температури, що працюють на різних фізичних принципах і виготовлених з різних матеріалів, дозволяє вимірювати її навіть у самих важкодоступних місцях - там, де інші параметри виміряти неможливо (наприклад, в активній зоні атомних реакторів). Температура як кількісний показник внутрішньої енергії тіл є універсальною характеристикою об'єктів і процесів фізичного світу, в якому безперервно відбувається генерація, перетворення, передача, накопичення і використання енергії в її різних формах. Аналіз теплових процесів (температурних полів, втрат тепла тощо) дозволяє отримати різноманітну інформацію про стан об'єктів і протіканні фізичних процесів у різних областях діяльності [1].

Діагностика (визначення технічного стану) радіоелектронної техніки (РЕТ) в сучасних умовах вимагає розвитку нових методів з широким застосуванням обчислювальної техніки та інформаційних технологій. Використання температурних характеристик в якості діагностичного параметру є основою методу власного випромінювання.

**Постановка задачі.** Для визначення можливості застосування засобів дистанційної реєстрації температури в технічній діагностиці РЕТ необхідно провести аналіз їх основних характеристик та етапів розви-

тку. Також потрібно розглянути особливості визначення діагностичного параметру методу власного випромінювання, через повний потік випромінювання  $P$  між двома тілами: вимірювальний пристрій – РЕК (під дією перевірних тестових послідовностей).

### Основна частина

Висока інформативність та широкі потенціальні можливості методів НК обумовлені використанням практично всього частотного діапазону електромагнітного спектру, що дозволяє створювати технічні засоби, які мають можливість «бачення» в оптично непрозорих середовищах. Цей процес здійснюється шляхом візуалізації з допомогою оптико-електронних систем невидимих людському оку зображень, що створюються в рентгенівському, ультрафіолетовому, інфрачервоному та інших діапазонах електромагнітного спектру. Оптичні зображення є найбільш зручним, оптимальним видом, який сприймається людиною.

Аналіз графічного зображення спектра електромагнітного випромінювання, показує, що видимий діапазон, тобто, діапазон, в якому бачить людина без застосування технічних засобів, складає лише невелику його частину. Для одержання більшої кількості інформації про оточуючий нас світ чи про окремі об'єкти необхідно здійснювати «бачення» в інших діапазонах [2].

Досить інформативним є інфрачервоний (ІЧ) діапазон спектру, що обумовлюється тим, що саме в ньому зосереджена основна доля власного електромагнітного випромінювання більшості об'єктів природного і штучного походження, що оточують нас. ІЧ-діапазон охоплює довжини хвиль від 0,76 до 1000 мкм (частоти від 300 до 0,3 ТГц). Ця область спектру умовно ділиться на п'ять проміжних діапазонів – ближній (0,76 – 1,1 мкм), короткохвильовий (1,1 – 2,5 мкм), середньохвильовий (3,0 – 5,5 мкм), довгохвильовий (8 – 14 мкм) і дальній (15 – 1000 мкм). Іноді два перші діапазони для зручності об'єднують в один [3].

Слід зазначити, що особливий інтерес викликає більш інформативний діапазон 8 – 14 мкм, повністю

співпадаючий з найбільш широким вікном прозорості атмосфери і такий, що відповідає максимальній випромінювальній здатності спостережуваних об'єктів в температурному діапазоні від  $-50$  до  $+500$  °С.

ІЧ діапазони  $3 - 5,5$  і  $7 - 14$  мкм є робочими зонами такого виду неруйнівного контролю як тепловий неруйнівний контроль. Це вид неруйнівного контролю, заснований на реєстрації змін теплових або температурних полів контрольованих об'єктів. При цьому метод неруйнівного контролю – метод власного випромінювання (надалі – МЕТОД), заснований на реєстрації параметрів власного випромінювання контрольованого об'єкту, будь-які процеси, що відбуваються в природі і людській діяльності, супроводжуються поглинанням і виділенням, змінюючи внутрішню енергію тіла, яка в стані термодинамічної рівноваги пропорційна температурі речовини. В результаті цього поверхні фізичних тіл набувають специфічного температурного розподілу.

Основним шляхом реалізації методу є створення апаратних засобів, що забезпечують перетворення температурного розподілу або інфрачервоного випромінювання у видиме зображення. Реалізація можливостей методу, що забезпечує як виявлення внутрішніх дефектів в різних об'єктах зумовила створення широкого спектру тепловізійних апаратних засобів: портативних, мобільних, стаціонарних. [3].

В основу принципу дії тепловізійних приладів покладено двовимірне перетворення власного теплового випромінювання від об'єктів і місцевості або фону, у видиме зображення. Тепловізійна техніка має ряд переваг і властивих тільки їй можливостей: виявлення віддалених тепловипромінюючих об'єктів незалежно від рівня природної освітленості, а також до певної міри – теплових або інших перешкод (дим, дощу, туману, снігу, пилу і тому подібне).

Умовно можна виділити чотири покоління розвитку тепловізійної техніки [4]. **Нульове покоління** засноване на застосуванні одиничних охолоджуваних приймачів і двовимірної (рядкової і кадрової) розгортки за допомогою скануючої оптико-механічної системи. **Перше покоління** – засноване на застосуванні лінійок приймачів і спрощеної кадрової розгортки; друге покоління – на використанні згрупованих декількох лінійок (з тимчасовою затримкою і накопиченням) і більш низькошвидкісною системою розгортки. **До другого покоління** відносять вакуумні прилади з електронним скануванням приймальної мішені – пірокони. **Третє покоління** засноване на застосуванні матриці елементів, тобто фокально-площинних (FPA – Focal Plane Array), двовимірних твердотілих багатоелементних (матричних) приймачів випромінювання (МПВ), тобто без використання оптико-механічних систем розгортки [5].

Розвиток тепловізійної техніки йде в основному шляхом застосування неохолоджуваних багатоелементних МПВ, фізичні характеристики яких дуже

високі і практично не поступаються охолоджуючим системам. Сучасні тепловізійні системи (ТПС) мають малу вагу, незначні розміри і енергоспоживання, забезпечують безшумну роботу і високу якість тепловізійного зображення, широкий динамічний діапазон при роботі в режимі мовного тепловізійного стандарту, цифрову обробку в реальному масштабі часу, зв'язок з ЕОМ і тому подібне та діляться на два основні класи.

ТПС вимірювання (термографи). Вимірювальні (радіометричні) ТПС використовуються переважно для кваліфікованої теплової діагностики різних промислових об'єктів, техніки, будівель, споруд, механізмів і тому подібне.

ТПС спостереження; ТПС спостереження призначені для виявлення, розпізнавання і візуалізації на фоні теплових перешкод віддалених тепловипромінюючих об'єктів (цілей).

В основі сучасних ТПС лежать неохолоджувані перетворювачі ІЧ-випромінювання, що є фокально-площинними двовимірними багатоелементними матрицями, здатними сприймати температурні контрасти до  $50 - 80$  мК. У спектральному діапазоні  $8 - 14$  мкм в не охолоджуваних ТПС використовуються в якості перетворювачів мікроболометричні фокальні матриці великого формату і багатоелементні приймачі на основі піроелектриків або сегнетоелектриків.

Переваги МБ систем:

відсутність охолодження – робить їх економічними по споживаній потужності, легшими і дешевшими, ніж охолоджувані ТПС. МБ-системи здатні виходити на робочий режим за декілька секунд;

можливість роботи без механічних модуляторів. МБ-системи є безшумними, що важливо для роботи в умовах прихованого спостереження;

чутливість МБ-приймачів в широкому спектральному діапазоні. Нині практично використовується найбільш поширений діапазон  $8 - 14$  мкм, але МБ потенційно придатні для створення перспективних багато спектральних систем.

Програма вдосконалення неохолоджуваних тепловізійних систем (Advanced Uncooled Thermal Imaging Program) Агенства по перспективних оборонних науково-дослідних проектах (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA) передбачає створити мікроболометр формату  $1280 \times 960$ , розміром пікселів  $15$  мкм при температурному розділенні  $10$  мК. Нині виробляють матриці розміром  $640 \times 480$  мкм при розмірі пікселя  $17$  мкм (L – 3 Communication, США), очікується серійний випуск цією фірмою матриць форматом  $1280 \times 1024$ , з пікселем  $17$  мкм і чутливістю менше  $20$  мК. Застосування таких матриць значно поліпшить просторове і температурне розділення ТПС.

Що стосується іншого типу неохолоджуваних матричних ІЧ-приймачів – піроелектричних (ППВ), то по чутливості вони дещо поступаються МБ-матрицям. NETD ППВ не перевищує  $80$  мК, типове

значення лежить в межах 100 – 150 мК. Найбільш використовуваний формат 320 x 240 елементів, останнім часом з'явилися матриці форматом 640 x 512 і 512 x 256 пікселів. Існує сфера застосування піроелектричних матриць, де вони мають явну перевагу над болометричними – цілодобові системи спостереження, при роботі яких є вірогідність прямої сонячної дії на чутливу область матриці. Вірогідність виходу з ладу в цьому випадку піроелектричної матриці значно нижча, ніж болометричної.

Тепловізійні системи характеризуються сукупністю показників, що визначають їх ефективність, до основних з яких відносяться [6]: вірогідність виявлення, розрізнення і розпізнавання об'єкту, мінімальна різниця температур виявлення, кутове (лінійне) розділення, ширина смуги захоплення місцевості (кут огляду), число відтворюваних градацій температур.

Незважаючи на відносну повноту і універсальність застосування, основні показники ефективності не придатні для опису власне апаратури, бо вони залежать не лише від неї самої, але також і від умов її використання, параметрів об'єкту і фону. Тому для оцінки тепловізійної апаратури доцільно використовувати систему її узагальнених технічних параметрів, основними з яких є [7]: поріг чутливості (NETD), кутовий елемент розділення, кут огляду, спектральний робочий діапазон, діапазон реєстрованих різниць температур, діапазон щільності зображення, швидкодія;

Сутність методу власного випромінювання полягає в реєстрації та обробці в якості діагностичного параметру – теплового випромінювання поверхні РЕК. Під дією вхідних тестових послідовностей змінюється теплове випромінювання поверхні РЕК. В ході теплових методів обстеження здійснюється порівняння експериментальних даних з еталонними даними (значеннями ДП, отриманими за певних умов на підприємстві виробника, які характеризують технічно справний РЕК або цифровий блок).

Запропонований метод діагностування доцільно застосовувати для локалізації несправних РЕК в складі цифрових блоків. В порівнянні з існуючими, запропонований метод має такі переваги:

- виключення необхідності використання вихідних контактів та контрольних точок для визначення несправного радіоелектронного блоку;
- відсутній вплив пристрою діагностування на «власну» надійність радіоелектронного блоку, так як до нього не додаються нові елементи та не змінюється принципова схема;
- можливість застосування методу як до існуючих, так і до перспективних радіоелектронних блоків з забезпеченням заданої достовірності контролю технічного стану;
- скорочення часу діагностування радіоелектронного блоку в 2 – 3 рази в порівнянні з відомими методами.
- наявність єдиного методологічного підходу (використання інформаційних технологій, можливості

обмінюватися інформацією з аналогічними системами, інтеграція в локальні та регіональні системи) [1, 8].

Безконтактний спосіб зняття ДП (безконтактні ДДС) більш ефективний ніж контактний, тому що застосування цих способів не вимагає втручання в роботу РЕО (а за наявності відповідних вікон контролю відсутня необхідність відкриття корпусів та блоків РЕО), діапазон вимірюваних температур не обмежено, є можливість контролю великої кількості точок одночасно.

У випадку теплового випромінювання, діагностичний параметр (ДП) визначається через повний потік випромінювання  $P$  між двома тілами – РЕК (під дією перевірних тестових послідовностей) та пристроєм зняття діагностичної інформації (пристроєм реєстрації теплового випромінювання).

Абсолютно чорні і абсолютно білі тіла в природі відсутні, всі реальні тіла – нечорні тіла (і поглинають, і відбивають енергію) [9 – 11].

По характеру спектру випромінювання всі нечорні тіла можуть бути розділені на тіла з селективним випромінюванням (можуть випромінювати і поглинати енергію лише в певних областях спектру, характерних для кожного тіла) і сірі тіла (поглинає одну і ту ж частку падаючого на нього випромінювання у всьому діапазоні довжин хвиль).

Ступінь чорноти (коефіцієнт чорноти, коефіцієнт сірості) сірого тіла  $\epsilon$  (це характеристика матеріалу, залежна від його температури і стану його поверхні),  $\epsilon$  відношення енергії, що випромінюється даним тілом при температурі  $T$ , до енергії випромінювання абсолютно чорного тіла при тій же температурі. Ступінь чорноти тіла чисельно дорівнює його поглинальній здатності:

$$\epsilon = A. \quad (1)$$

Значення  $\epsilon$  для різних матеріалів табульовано. Згідно закону Стефана-Больцмана, інтегральна по спектру щільність потоку випромінювання (енергетична яскравість) абсолютно чорного тіла  $E_0$  (Вт/м<sup>2</sup>) складає:

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \text{ або } R_s = \sigma T^4, \quad (2)$$

де  $T$  – температура тіла;  $C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла:

$$C_0 = 5,67 \left( \text{Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4) \right); \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (K)}.$$

Для нечорних тіл, щільність потоку випромінювання визначається співвідношенням:

$$E = \epsilon C_0 (T/100)^4, \quad (3)$$

де  $\epsilon$  – ступінь чорноти тіла.

Вираз (3) точно описує випромінювання сірих тіл а для тіл з селективним випромінюванням воно справедливе приблизно [9].

Повний потік випромінювання сірого тіла рівний:

$$P = \epsilon C_0 (T/100)^4 S = R_s \cdot S = \sigma T^4 S, \quad (4)$$

де  $S$  – поверхня випромінювання тіла.

Звідси, діагностичний параметр ( $T$ ) має вид:

$$T = \sqrt[4]{P/(\sigma S)}. \quad (5)$$

Враховуючи реальні геометричні розміри засобів реєстрації теплового потоку, РЕК, та ступені чорноти обох тіл, потік випромінювання між ними розраховується, як:

$$P = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 H \left[ (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right], \quad (6)$$

де  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведений коефіцієнт чорноти системи:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left( 1 + (1/\varepsilon_1 - 1)\varphi_{12} + (1/\varepsilon_2 - 1)\varphi_{21} \right), \quad (7)$$

де  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – ступені чорноти тіл;  $\varphi_{12}, \varphi_{21}$  – коефіцієнти опромінення РЕК на засіб реєстрації та засіб реєстрації на РЕК, що показують, яка частка енергії, що випромінюється одним тілом, потрапляє на інше тіло (наприклад,  $\varphi_{12}$  показує частку енергії випромінювання тіла 1, що потрапляє на тіло 2).

$H$  – взаємна поверхня опромінювання (РЕК – засіб реєстрації),  $H = \varphi_{12}S_1 = \varphi_{21}S_2$ ,  $S_1, S_2$  – поверхня випромінювання РЕК та засобу реєстрації теплового потоку.

## Висновки

Таким чином, викладений вище матеріал дозволяє представити можливості тепловізійної техніки для рішення завдань, пов'язаних з виявленням, виділенням і розпізнаванням температурних аномалій. Виробники неохолоджуваних ТПС пропонують широкий ряд апаратних тепловізійних засобів, що дозволяє вибрати оптимальну, з точки зору функціональних характеристик, систему для вирішення завдання технічної діагностики.

У випадку теплового випромінювання, повний потік випромінювання нагрітого тіла визначається за потоком випромінювання між двома тілами (4), (6) та залежить від значень коефіцієнта опромінення  $\varphi$ , і взаємної поверхні опромінювання  $H$ , що є геометричними параметрами тіл, які беруть участь в променистому теплообміні (РЕК та пристрій реєстрації теплового випромінювання), і від їх взаємного розташування. Діагностичний параметр ( $T$ ) визначається за (5) або виводиться з (6) з урахуванням (7).

Напрямок подальших досліджень є визначення особливостей зміни діагностичного параметру в методі власного випромінювання при різних видах переносу теплової енергії під дією тестових послідовностей.

## Список літератури

1. Вишинівський В.В. Термографія як засіб пасивного контролю технічного стану радіоелектронних схем / В.В. Вишинівський, В.В. Кузавков, Є.В. Редзюк // ВІП ДУТ. VII-й НПС «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». – К., 2013. – С. 86
2. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение: пер. с англ. / А. Роуз. – М.: Мир, 1977. – 216 с.
3. Тарасов В.В. Тенденции развития инфракрасных систем «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушников // Специальная техника. – 2004. – № 1. – С. 24-37; – 2004. – № 3. – С. 16-25.
4. Тарасов В.В. Тенденции развития тепловизионных систем второго и третьего поколений и некоторые особенности их моделирования (по материалам зарубежной печати) / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушников // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений / ЦНИИ «Циклон». – 2001. – Вып. 1. – С. 3-18.
5. Тарасов В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушников. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
6. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988.
7. Ковалев А.В. Тепловидение сегодня / А.В. Ковалев, В.Г. Федчишин, М.И. Щербаков // Специальная техника. – 1999. – № 3. – С. 13-18; 1999. – № 4. – С. 19-23.
8. Вишинівський В.В. Термографія як засіб пасивного контролю / В.В. Вишинівський, В.В. Кузавков, Є.В. Редзюк // 9 міжнародна НПК: Військова освіта і наука: сьогодні та майбутнє; 22.11.2013; тези доп. – К., 2013. – С. 33.
9. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочн. пособ. / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
11. Блох А.Г. Теплообмен излучением: справоч. / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

Надійшла до редколегії 26.12.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА СНЯТИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В МЕТОДЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Колачов, В.В. Кузавков

Рассматриваются основные характеристики средств дистанционной регистрации температуры, возможность их использования для бесконтактного способа снятия диагностической информации в методе собственного излучения.

**Ключевые слова:** средства дистанционной регистрации температуры, диагностическая информация, метод собственного излучения.

## TEMPERATURE SENSORS FOR CONTACTLESS WAY OF REMOVING THE DIAGNOSTIC INFORMATION IN THE METHOD OF SELF-RADIATION

S.P. Kalachov, V.V. Chuzavkov

The article examines the main characteristics of the technical means of remote temperature recording, the possibility of their use for non-contact way of removing the diagnostic information in the method of self-radiation.

**Keywords:** remote temperature recording, diagnostic information, the method of self-radiation.