

політехніка”, 1997. – 160 с. 6. Волочій Б.Ю. *Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем: Монографія.* – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – 220 с. 7. Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. *Моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем у задачах дослідження їх відмовостійкості // Відбір і обробка інформації.* – Вип. 28 (104). – 2008. – С. 39–47. 8. Abd-El-barr M. *Design And Analysis of Reliable And Fault-tolerant Computer Systems, Imperial Collegdge Press, 2006.* 9. Walls L. and Alkali B. *Advances in Mathematical Modeling for Reliability, IOS Press, 2008.*

УДК 004.051:353

**В.І. Боженко, В.І. Шклярський**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра радіоелектронних приладів та систем

## **ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ЗАСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ОБ’ЄКТІВ**

© Боженко В.І., Шклярський В.І., 2010

**Проаналізовано можливість застосування тепловізійних систем для дослідження теплових об’єктів, процес формування тепловізійного зображення, його складові частини та можливі методи поліпшення результатів цього процесу.**

**Possibility of the thermal systems application for the thermal objects research, the process of the thermal image forming, its component parts and possible methods of this process results improvement, are analysed.**

**Вступ.** Серед сучасних засобів дослідження стану об’єктів одне з чільних місць посідають засоби теплового моніторингу [1, 3, 8–10, 18, 21]. Ці засоби забезпечують візуалізацію теплового стану об’єкта за рахунок перетворення теплового випромінювання на електричний сигнал, який надалі використовується для аналізу стану об’єкта спостереження, що дає змогу розв’язувати задачі дистанційного та безконтактного неруйнівного контролю в недоступному для людського зору інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра випромінювання.

**Мета роботи.** Вихідний результат роботи тепловізійних систем (ТС) потребує покращення, оскільки отримані теплові зображення (ТЗ) найчастіше є зашумленими, слабкояскравими, малоконтрастними та не відповідають вимогам користувача. Відповідно постає задача аналізу процесу формування ТЗ у ТС [3, 13, 19], складових частин цього процесу [11–12, 18, 22–23, 27] та можливих методів покращення таких зображень [5, 16–17, 20], які б відповідали вимогам до сучасних засобів дослідження теплових об’єктів.

**Основна частина.** Принцип роботи ТС ґрунтується на тому, що усі тіла, тверді та рідкі, нагріті до певної температури, випромінюють енергію в ІЧ-спектрі. Довжини хвиль, що випромінює тіло, залежать від температури нагрівання: чим вища температура, тим коротша довжина хвилі та вища інтенсивність випромінювання [3]. Як відомо, ІЧ-діапазон хвиль розташований між видимим і радіохвильовим діапазонами і займає область від 0,74 до 1000 мкм, що відповідає частотному діапазону  $3 \cdot 10^{12} \div 1,5 \cdot 10^{15}$  Гц.

Для оцінки якості перетворення ІЧ-випромінювання на електричний сигнал використовують такі показники [9–10, 12–13, 18, 22, 27]: робочий спектральний діапазон, чутливість перетворювача теплового випромінювання на електричний сигнал, модуляційна передавальна функція (МПФ) системи, мінімальна розрізняювана різниця температур (МРРТ), відношення сигналу до шуму (С/Ш), середньоквадратичне значення шуму.

Експлуатаційні характеристики системи, яка забезпечує візуалізацію теплового стану досліджуваного об'єкта, визначає сукупність таких показників: масогабаритні параметри, енергоспоживання, роздільна здатність формованого зображення, температурна роздільна здатність та максимальна відстань сприйняття випромінювання.

Прагнення збільшити функціональні можливості та розширити область застосування ТС підвищують вимоги, насамперед до максимальної відстані сприйняття випромінювання. При цьому важливим є визначення такої фокусної відстані ТС  $F_{max}$ , яка забезпечує максимальне значення відстані розпізнавання з температурним контрастом  $\Delta T_0$  [1]. Для малорозмірних об'єктів, зображення яких співрозмірне з розміром поля зору ТК, його визначають як

$$F_{max} = 0,56 \frac{b \cdot t_a \cdot \Delta T_0 \cdot D_0^2}{A} \cdot \exp \frac{-0,3(b \cdot t_a)^2 \cdot \Delta T_0 \cdot D_0^2}{p \cdot r \cdot a \cdot A}, \quad (1)$$

$$b = h/n, r = \Gamma/a, \quad (2)$$

де  $h$  – максимальний розмір об'єкта;  $n$  – кількість періодів еквівалентної штрихової міри, що вкладається на максимальний розмір об'єкта залежно від рівня його розпізнавання;  $D_0$  – діаметр вхідної зіниці оптичної системи;  $A$  – добуток усіх співмножників при розрахунку МРРТ, що не залежать від значень  $F_{max}$  та  $D_0$ ;  $a$  – лінійний розмір розрізняваного елемента зображення (піксела);  $\alpha$  – кутовий розмір піксела;  $\Gamma$  – середньоквадратичне відхилення значення функції, що апроксимує МПФ системи.

ТС мають істотні переваги порівняно з системами формування зображення у видимому діапазоні: забезпечення розпізнавання незалежно від рівня природної освітленості, що дає їм змогу працювати цілодобово, можливість роботи в умовах інтенсивних світлових перешкод і до певного ступеня – за зниженої прозорості атмосфери (туман, дощ, снігопад, пил, дим тощо). Суть теплового моніторингу полягає у тому, що елементи формованого за допомогою ТС на екрані монітора зображення мають яскравість, яка відповідає температурі фрагментів поверхні досліджуваного об'єкта. При формуванні ТЗ в інженерній практиці об'єкт замінюють сукупністю випромінювальних поверхонь, які вважають сірими випромінювачами з апріорно відомими в обмеженому спектральному діапазоні температурами об'єкта та фону, коефіцієнтом випромінювання, площею, орієнтацією, без урахування взаємовпливу поверхонь [13].

ІЧ-спектр поділяють [3] на три ділянки; відповідно виокремлюють типи та класи й приймачі, які його сприймають (рис. 1).

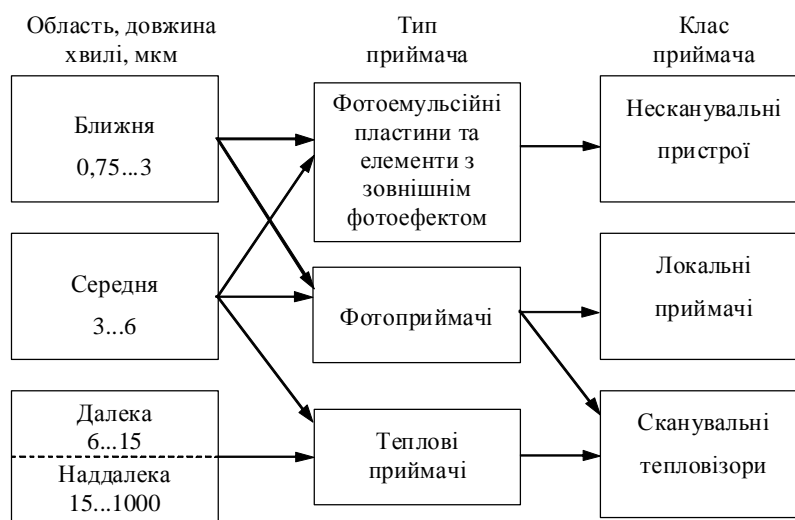


Рис. 1. Типи та класи приймачів, що сприймають ІЧ випромінювання

Фотоемульсійні пластини та елементи із зовнішнім фотоефектом застосовуються у ближній та середній областях – відповідно у локальних (пірметри, що порівнюють яскравості об'єкта вимірювання та еталонного нагрітого тіла) та несканувальних приймачах. Теплові приймачі, як

правило, не застосовують у локальних, а лише у сканувальних системах, що працюють у середній та далекій областях сприйняття.

Несканувальні локальні приймачі фіксують наявність ІЧ-випромінювання певних інтенсивностей та напрямків, можуть вимірювати інтенсивність випромінювання вибраних локальних ділянок чи точок об'єкта, але не відтворюють розподілу ІЧ-випромінювання по усій поверхні. Принцип їх дії оснований на явищі зовнішнього фотоэффекту – випромінюванні електронів речовиною під дією світла. Потік електронів прискорюється під впливом напруги близько 1000 вольт, фокусується електронно-оптичною системою і потрапляє на катодолюмінесцентний екран, викликаючи його свічення у видимій оком області спектра (переважно у зеленій). До таких приймачів належать: електронно-оптичні перетворювачі, пірографи, термолюмінесцентні, електролюмінесцентні та лазерні перетворювачі. Усі вони не відповідають вимогам, що висуваються до сучасних засобів дослідження теплових об'єктів, за температурною та просторовою роздільною здатністю, а також швидкодією [10].

Дія фотоприймачів (ФП) полягає у використанні внутрішнього фотоэффекту – утворенні електронних переходів, спричинених фотонами, що падають, що призводить до зміни провідності у фотоприймачів чи електричного поля – у гальванічних приймачів. Нині ФП [5, 10, 20] реалізують на базі фоторезисторів, фотодіодів, гібридних та монолітних приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), приладів із зарядовою інжекцією (ПЗІ), матриць на діодах Шотткі, та приймачів, побудованих за технологією SPRITE (Signal Processing In The Element – обробка сигналу в елементі).

У ПЗЗ світлочутливі елементи перетворюють випромінювання, що падає на них, на зарядовий пакет. Накопичення заряду пропорційне до освітленості й використовується для формування сигналу зображення. ПЗІ, на відміну від ПЗЗ, використовують не міжкомірковий, а внутрішньокмірковий зарядовий зв'язок. ФП з бар'єром Шотткі використовують фотоэффект у переході напівпровідник-метал. SPRITE-приймач – це фоторезистор (монолітна структура), що виконує функції приймання, затримки, інтегрування, підсилення та певної обробки сигналів від більше ніж 10 дискретних приймачів.

Розроблення матричних багатоелементних приймачів випромінювання на основі фокально-площинних двовимірних багатоелементних матриць ФП дало змогу створити новий тип ТС, які характеризуються такими ознаками [20]: використовуються фокально-площинні матриці з кількістю елементів, близькою до ТВ стандарту; кількість елементів у матрицях квадратного або прямокутного формату – 128x128, 256x256, 320x240/256, 640x480/512, 1024x1024 тощо; матриці можуть бути охолоджуваними (зазвичай застосовують охолоджувачі типу Стирлінг або Сплит-Стирлінг) та неохолоджуваними; покращилися МРРТ (до 14÷20 мК) та дальність сприйняття; сканування не застосовується.

Особливостями цих ТС є: розвинена схематехніка обробки сигналу; висока роздільна здатність; підвищена далекість розпізнавання. Особливо важливим виявилось створення малогабаритних неохолоджуваних ІЧ-матриць великого формату, а також відповідних ПЗЗ- та КМОН-схем зчитування та первинної обробки сигналів.

Нині багато фірм, найвідомішими серед яких на світовому ринку є Martin Lockheed, Kodak та Texas Instruments (США), Thomson-CSF Semiconducteurs (Франція), Sony (Японія), випускають ФП на базі ПЗЗ [15-16, 24, 27]. Основними показниками, що характеризують ФП на базі ПЗЗ (гарантуються виробником при температурі до +15°C), є такі.

1. Архітектура ФП на базі ПЗЗ розкриває порядок розміщення фоточутливих комірок, кількість каналів виведення (регістрів зсуву) й адресацію відеосигналу відносно відповідної фотокомірки [3–4].

2. Чутливість показує відношення вихідного електричного сигналу (напруга чи струм) до величини світлового потоку, що падає [22].

3. Інтегральна чутливість відношення вихідного електричного сигналу (напруга чи струм) до величини світлового потоку стандартного джерела, що падає, у всьому діапазоні спектральної чутливості [15].

4. Порог чутливості ФП і його динамічний діапазон характеризують діапазон сигналів по оптичному вході, у якому гарантуються лінійні перетворювальні характеристики ФП [16].

5. Час інтегрування (експозиції) – визначає інерційність ФП і входить у вигляді співмножника в коефіцієнт перетворення світлового випромінювання на електричний сигнал.

6. Швидкодія визначає мінімально досяжний крок дискретизації зображення в напрямку руху. Тому низька швидкодія може стати перешкодою для застосування придатного за всіма іншими характеристиками ФП на базі ПЗЗ [18].

7. Розміри фотокомірок та їхній крок і кількість у рядку визначають вимоги до оптичної системи ТС (фокусна відстань, діаметр зніци об'єктива, діаметр робочої зони у площині мішені) та співвідношення між смугою пропускання відеотракту і просторовою роздільною здатністю [24].

8. МПФ у довідкових і паспортних матеріалах на ФП зазвичай наводять у вигляді графіків, нормованих за кроком її дискретизації. Динамічний коефіцієнт передачі модуляції (КПМ) у напрямку руху зображення можна одержати множенням на значення приведеної геометричної МПФ, розрахованої за переміщенням зображення за час інтегрування.

9. Ефективність перенесення заряду визначає ступінь погіршення КПМ і зменшення рівня відеосигналу віддалених від вихідного детектора фотокомірок.

Істотним недоліком застосування ФП на базі ПЗЗ є необхідність використовувати декілька джерел напруги (від 5 до 15 В) та висока вартість виготовлення ФП на базі ПЗЗ [18]. Також окремого розгляду потребує проблема охолодження ФП. Охолодження ІЧ-приймача заглушує його власне ІЧ випромінювання а відтак підвищує його чутливість. Водночас у багатоелементних приймачах кількість виводів, що з'єднують охолоджувану і неохолоджувану частини ТК, залишається великою, що збільшує теплові потоки та ускладнює охолодження і загальну реалізацію.

Останнім часом на ринку з'явилися лінійні та матричні ФП з КМОН-структурами, що відрізняються, як правило, схемою інтегровальних ланок та застосуванням спеціальних схем автокорекції нуля інтегровальних підсилювачів [24]. Порівняно із ФП на базі ПЗЗ перевагою ФП на базі КМОН є їхні низькі вартість та рівень енергоспоживання, а недоліки полягають у такому:

1. Високий рівень шумів, який не дає змоги забезпечити достатньої якості зображення [23].

2. Послаблення сигналу від шару до шару матриці за рахунок "розмитості" світла від одного шару до іншого, оскільки у кожному шарі поглинається деяка кількість світла за рахунок наявності світлофільтрів [25, 27].

3. Коефіцієнт заповнення, що визначає відношення площини фоточутливого елемента до всієї площини матриці в процентах, не перевищує 20–40 %. Необхідність використання у кожному елементі матриці, окрім світлочутливого елемента, схем підсилення, шумопридушення тощо призводить до спотворень при формуванні динамічного зображення [3].

4. Для отримання якісного зображення інформація з КМОН-давача потребує додаткової обробки для корегування дефектних пікселів, балансу білого, інтерполяції світлофільтрів для корегування мозаїчності та стиснення даних для подальшого передавання стандартним інтерфейсом [18].

*Теплові приймачі* (ТП) поглинають ІЧ-випромінювання, перетворюючи його на електричний сигнал за рахунок зміни своїх параметрів. Серед них найширше використовують термоелектричні приймачі, які ґрунтуються на залежності від тепла електричних властивостей його матеріалу: елементи на термопарах (в них за рахунок ефекту Зеебека при неоднаковому нагріванні різних поверхонь виникає термоелектрорушійна сила), болометри (ґрунтуються на зміні електропровідності матеріалу) та піроелектрики (їх дія яких полягає у властивості піроелектричних кристалів змінювати свою поляризацію під час нагрівання). Порівняно з ФП основною перевагою ТП є їхня спектральна неселективність, яка уможливує роботу в широкому спектральному діапазоні, зокрема у діапазоні 8÷14 мкм, використання якого найвигідніше при спостережанні об'єктів, температура яких є близькою до температури навколишнього середовища. ТК на основі ТП переважно використовують для задач візуалізації та спостереження теплових явищ. Використання ж ТП для задач термометрії можливе, але проблематичне через складнощі їх калібрування [1, 27].

Сканувальні приймачі, порівняно з ФП, мають таку перевагу, як відсутність потреби у примусовому охолодженні мішені і складної оптико-механічної розгортки, що зумовлює простоту приладів на їх базі в експлуатації та вартість, на порядок нижчу, ніж у ТК із ФП на базі ПЗЗ. Крім того, важливою особливістю таких ТК є неселективність, тобто можливість роботи у широкому ІЧ-діапазоні. Серед камер з мішенями на ТП сьогодні найефективнішими є піровідиконні (ПВ) – на відиконах з піроелектричною мішенню, оскільки їх застосування дає змогу використовувати багатий досвід розроблення та експлуатації ТВ техніки і розширити її спектральний діапазон до далеких і середніх ІЧ довжин хвиль (3,5÷5 та 8÷14 мкм) [11, 13–14], в яких відбувається найінтенсивніше випромінювання променевої енергії об'єктів, що працюють при атмосферній температурі або близькій до неї. Крім того, у цьому спектральному діапазоні міститься вікно прозорості атмосфери, пропускання електромагнітного випромінювання через яке відбувається з найменшими втратами, що уможливорює використання цих ТК цілодобово та в складних погодних умовах.

Характерними особливостями формованого ПВ ТК зображення досліджуваного об'єкта є: вищий рівень шуму та нижча контрастність порівняно із зображеннями, формованими ТВ-камерами у видимому діапазоні; висока роздільна здатність ТЗ досягається лише на малих відстанях, а покращення просторової роздільної здатності (ПРЗ) викликає збільшення МРРТ; оскільки ПВ є диференційним приймачем, формоване за його допомогою ТЗ відображає не статичний, а динамічний стан об'єкта; точності вимірів істотно перешкоджає значна просторова та часова нерівномірність п'єдесталу мішені ПВ, відносно якого формується корисний сигнал; збільшення кількості елементів розкладу зображення призводить до різкого збільшення інформації, необхідної для попереднього калібрування з метою компенсації нерівномірності розподілу ПРЗ та МРРТ-мішені, тому калібруванню мають підлягати не окремі приймальні комірки, а елементи розкладу електронного сканування мішені; такі явища, як фонове випромінювання, термодифузія, сегнетоэффект, флуктуація випромінювальних та поглинальних властивостей досліджуваного об'єкта тощо призводять до маскування контурів фрагментів ТЗ та його спотворення загалом.

Для вимірювання температури об'єкта за його ІЧ-випромінюванням застосовують [13] методи часткової радіації (при вимірах об'єктів з великими значеннями похибки та ІЧ-випромінювання), спектрального співвідношення (для вимірів високотемпературних об'єктів) та енергетичної температури (повної радіації), який завдяки його неселективності застосовується найширше як найпридатніший для ТК на ПВ.

Перевагами ПВ ТК сьогодні вважають [13]:

- помірну ціну та конструктивну простоту побудови (їх вартість більше ніж на порядок нижча за вартість ТК на ФП та приблизно у 5–7 разів нижча за вартість ТК на матричних ТП);
- достатню для переважної більшості задач просторову роздільну здатність;
- інтегральну чутливість, наближену до одноелементних ФП;
- можливість роботи у широкому спектральному діапазоні (від ультрафіолетового до далекого ІЧ);
- сумісність з ТВ-системами (від звичайного відикона піровідикон відрізняється лише матеріалом мішені та її кріпленням), що дає змогу використати багатий досвід розроблення та експлуатації ТВ техніки.

До основних недоліків сучасних ПВ ТК належать розмитість, зашумленість, низька яскравість, мала контрастність, недостатня наочність представлення ТЗ досліджуваних об'єктів, вплив асинхронних завад та низьке відношення С/Ш, а також те, що ТЗ, отримані за допомогою ПВ ТК, є складними для аналізу оператором ТС стану об'єктів із динамічною зміною температурного сигналу.

Основні вимоги [10] до сканувальних ТС з погляду їх експлуатації наведено в таблиці.

### Вимоги до параметрів ТС залежно від галузі застосування

Показник \ Галузь	Військова справа	Медицина	Радіоелектроніка	Енергетика	Будівництво
Спектральний діапазон, мкм	3-13	3-5	3-12	8-12	8-12
Температурний діапазон, °С	-40...+100	+20... +50	+10...+100	-40...+300	-40...+300
МРРТ, °С	0,2	0,1	1	1	0,5
Гранична просторова роздільна здатність	1 мрад	1 мм	15 мкм	1 мрад	2 мрад
Фокусна віддаль	велика	мала	<0,5 м	велика	велика
Мінімальний розмір зображення, ел-тів	200x120	200x150	200x150	200x100	200x100
Тип зображення	динамічне	статичне	статичне	статичне	статичне

Сьогодні в Україні все ще залишається актуальним (особливо в умовах дефіциту бюджету) використання сканувальних ТС на основі ПВ ТК. Це пов'язано з такими їх перевагами, як порівняно низька вартість (на порядок нижча, ніж у ТС на базі матричних приймачів випромінювання), невеликі масогабарити, низьке енергоспоживання, можливість роботи в широкому діапазоні ІЧ-спектра, що уможливило їх масове використання як систем теплового неруйнівного контролю й діагностики, зокрема в режимі реального часу.

Аналогом ТС є телевізійні системи, які працюють у видимому діапазоні спектра та надають інформацію у звичайному для сприйняття вигляді. ТЗ в ТС утворюється головню за рахунок власного випромінювання та різниць у випромінювальній здатності об'єктів спостереження. Загалом завданням ТС є перетворення невидимого ІЧ-випромінювання теплоконтрастних об'єктів у площині спостереження на аналог видимого зображення на екрані індикатора для їх виявлення, розпізнавання та ідентифікації (дешифрування).

Дія сканувальних ТС полягає у прийманні потоку випромінювання та інтегруванні його в просторі. Сканування досліджуваного об'єкта може здійснюватися оптико-механічним або електронним способом.

Під час оптико-механічного сканування здійснюється зміна напрямку світлового потоку за допомогою системи відбивних чи заломлювальних елементів (призм, пірамід, плоских дзеркал, барабанів, пластин), що здійснюють механічний рух. Сканування, як правило, відбувається у двох взаємно перпендикулярних координатах. При застосуванні лінійчатих ФП можливе комбіноване сканування, коли переміщення по одній координаті сканера здійснюється механічним способом, а по іншій – електронним за рахунок послідовного опитування елементів ФП. З-поміж наявних систем вони найчутливіші, але їх можливості обмежують досить високі інерційність, конструктивна складність та рівень власних шумів.

ТС з електронним скануванням з повним перекриттям поля огляду камери розглядатимемо як системи з одночасним надходженням і послідовним передаванням інформації. Вони, на відміну від одноелементних приймачів з оптико-механічною розгорткою, триваліший час (обмежений періодом кадрової розгортки) сприймають інформацію про об'єкт, що викликає необхідність розширити смугу вихідного підсилювача. Час сприйняття світлового сигналу при електронному скануванні порівняно з використанням одноелементного ФП та механічного сканування є більшим і пропорційним до кількості елементів розкладу зображення (ЕРЗ), тому такі ТС мають значно вищу чутливість.

Недоліки ТС з електронним скануванням полягають у необхідності вирівнювання чутливості по усій поверхні мішені з метою усунення геометричного шуму, який збільшується зі збільшенням кількості ЕРЗ та забезпечення високої швидкодії сканування (яка повинна зростати зі збільшенням кількості ЕРЗ), що зменшує час накопичення сигналу та ускладнює схемотехнічну реалізацію.

До складу ТС (рис. 2) вводять, крім блоків сприйняття та перетворення ІЧ випромінювання, також блоки аналогової та цифрової корекції сигналів і формування зображення, а також передбачено можливість виведення ТЗ на телевізійний монітор або окулярну систему та цифровий вихід для під'єднання ПК для подальшої обробки та зберігання зображень.

Неоднорідності сигналів елементів ФП матриці заздалегідь коректуються в аналоговій формі, перетворюються в цифрову форму і коректуються з використанням даних, одержаних в процесі калібрування. Далі сигнали коректуються (можливе віднімання елементів матриці, що не працюють, з їх заповненням) і надходять в БФЗ. На його виході інформація видається або як відеосигнал, що подається в ТВМ, або в цифровій формі в ПК. Для глибокого охолодження матриці до температури  $75\div 80$  К використовується газова холодильна машина, що працює за замкненим циклом Спліт–Стірлінга. Для неглибокого охолодження ( $150\div 250$ К) або термостабілізації роботи неохолоджуваної матриці використовується система термоелектричного охолодження [5].

Основне призначення ТВ систем формування та відтворення зображення полягає у відтворенні зображень з такою якістю, за якої оцінка сприйняття зображення зоровим аналізатором людини була би близькою до оцінки якості сприйняття об'єктів за певних умов спостереження. В роботах [7, 26] проаналізовано способи формування зображення з урахуванням параметрів системи зорового аналізатора людини – спостерігача або оператора ТВ системи. Але ці роботи не дають відповіді на запитання: як покращити множину параметрів, що характеризують зображення, отримане в процесі теплового моніторингу (рис. 3)?

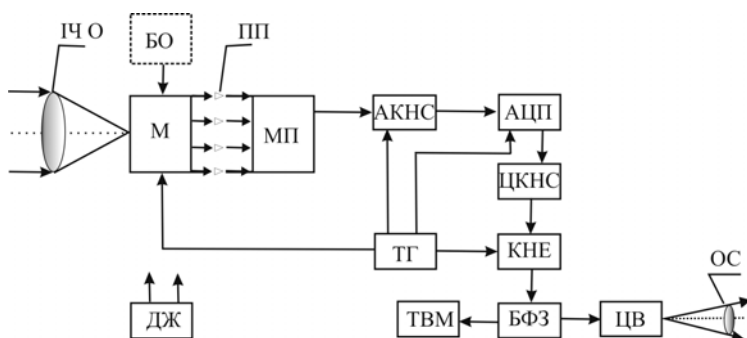


Рис. 2. Блок-схема тепловізійної системи, де: ІЧ О – ІЧ об'єкти; М – матриця ІЧ-фотоприймачів; БО – блок охолодження або термостабілізації; ПП – попередній підсилювач; МП – мультиплексор; АКНС – аналоговий коректор неоднорідності сигналів; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦКНС – цифровий коректор неоднорідності сигналів; КНЕ – коректор елементів фотоприймачів матриці, що не працюють; БФЗ – блок формування зображення з мікропроцесорною обробкою відеосигналу; ЦВ – цифровий вихід для під'єднання до ПК; ТВМ – телевізійний монітор; ОС – окулярна система; ТГ – тактовий генератор; ДЖ – первинне джерело живлення (акумуляторна батарея)

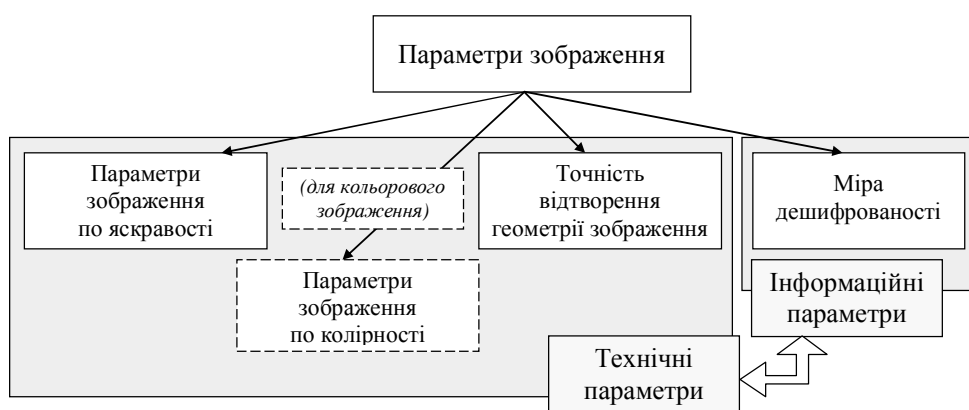


Рис. 3. Параметри, що характеризують телевізійне зображення

В узагальненому вигляді ці параметри утворюють дві основні групи – технічні та інформаційні. До складу першої групи входять параметри, які визначають якість відтворення чорно-білого зображення: яскравість, кількість градацій яскравості, контрастність, чіткість, різкість та зашумленість; додатково характеризують кольорове зображення: колірність, кольоровий контраст, чіткість, різкість та зашумленість зображення за колірністю, а також визначають точність

відтворення геометрії зображення: розмір, геометричні та нелінійні спотворення тощо. Друга група характеризує міру відхилення вихідного зображення від еталону, а також ступінь його корисності, тобто оцінює його інформативність, що вказує, якою мірою можна вилучити із зображення корисну інформацію, якої буде достатньо для його аналізу та експлуатації системи. Класифіковані в такий спосіб узагальнені параметри є найістотнішими, оскільки визначають якість відтворення зображення у будь-якій системі.

Необхідно зазначити особливості візуалізації ТЗ об'єкта і відповідні складнощі його дешифрування. Оскільки ТЗ формується за рахунок власного випромінювання об'єктів і полів, які мають різний розподіл температури та коефіцієнта випромінювання, воно істотно відрізняється від свого аналога у видимій області спектра. Наприклад, ТЗ не має тіней, що ускладнює просторове сприйняття об'єктів. Окрім того, для більшості об'єктів і полів відсутня кореляція між коефіцієнтом відбиття, температурним тлом і коефіцієнтом випромінювання, що зумовлює формування різних зображень у ТС. Крім того, порівняно з оптичним ТЗ має такі особливості: високий рівень шуму, низьку контрастність, наявність термодифузії, флуктуацію випромінювальних та поглинальних властивостей досліджуваного об'єкта, необхідність порівняння об'єкта теплового моніторингу з еталонним зображенням або з моделлю, яка будується і вважається задовільною на основі попередніх досліджень, а також те, що висока роздільна здатність досягається лише на малих відстанях.

Відтак процедури обробки ТЗ повинні мати пріоритети, відмінні від обробки оптичних зображень. Така обробка відбувається в усіх ланках ТС і поділяється на оптичну та електричну; остання поділяється на аналогову і цифрову. Первинна оптична обробка полягає у виборі оптимальних збільшення, світлосили, миттєвого кута зору та типу просторової і спектральної фільтрації, модуляції, сканування. У сучасних ТС найпоширенішою процедурою аналогової обробки є лінійне підсилення-обмеження сигналу, яке застосовується для максимального використання динамічного діапазону приймача випромінювання.

Забезпечуваний ТС процес виявлення та обробки інформації, яку містить ІЧ-випромінювання об'єктів, починається з досліджуваного об'єкта і завершується функціональним використанням одержаної інформації згідно із кінцевою метою. Уможливується виведення отриманого зображення на монітор, що значно спрощує сприйняття інформації.

Значна частина задач належить до специфічної галузі комп'ютерної техніки, оскільки є потреба порівнювати спостережувані явища з еталонами, або з моделлю, яка будується і вважається задовільною на основі попередніх досліджень. Цифрова обробка зображень є найзадовільнішим методом розв'язання таких задач, оскільки дає змогу, незалежно від застосованого сканування та параметрів вхідного сигналу, надавати оператору узгоджене з його зоровим сприйняттям зображення у ТВ стандарті або графічному форматі [3].

Процедури обробки теплового зображення повинні мати відмінні від опрацювання оптичного зображення пріоритети. Зазначені процедури поділяють [6, 17] на:

- первинні – перетворення стандартів, корекція нерівномірності сигналу в межах одного кадру та спотворень сигналу в ділянці верхніх частот, отримання різниці та суми кадрів з метою поліпшення відношення С/Ш, підсилення та логарифмування з метою компенсації фону зображення;

- препарувальні – формування ізотерм, контурів, силуетів, перетворення напівтонового зображення на сходинчаті (поліізотермальне), інтерактивне псевдокольорове кодування (кольоро-відтворення, розфарбування), побудова профілограм (зрізів та гістограм) вздовж певної лінії та псевдооб'ємних термограм, виділення і збільшення визначеної оператором зони зображення;

- обчислювальні – температуру певної точки, статистичні характеристики ТЗ, перетворення ІЧ-сигнатури на температурну, корекція результатів з огляду на властивості середовища, градування та еталонування;

- аналізуювальні – математичні операції над отриманими результатами за певним алгоритмом, зокрема, аналіз динаміки та автоматичне діагностування;



- поліпшувальні – лінійна та нелінійна фільтрація, контрастування та згладжування, зміна масштабу та орієнтації;
- архівувальні – формування супутньої символічної та графічної інформації, монохромної та кольорової шкал відліку, запам'ятовування отриманих результатів, зокрема певної кількості кадрів з їх подальшим пошуком, класифікацією і каталогізацією, тобто формуванням переліку збережених зображень та певних відомостей про них.

Як виробники, так і обсерватори у галузі теплобачення погоджуються з тим, що сформована останніми роками концепція переходу на тепловізійну апаратуру нової генерації – портативні ІЧ-камери на базі твердотільних багатоелементних гібридних (охолоджуваних та неохолоджуваних) матриць, є найперспективнішою на найближчі 10–15 років. Перспективи створення нових ТС пов'язані з використанням повністю твердотільних перетворювачів зображення, що працюють в області спектра  $0,9\div 2$  мкм та забезпечують спостереження в широкому діапазоні зовнішніх умов [20]. Відтак подальші роботи в галузі теплобачення вестимуться також у напрямі вдосконалення вже розроблених приладів; особлива увага приділятиметься ТК на основі піровідників та матричних фотоприймачів, основна перевага яких полягає у можливості отримання інформації з ширшого спектрального діапазону, у вищій чутливості і, відповідно, більшій ефективній відстані сприйняття ІЧ-випромінювання.

Аналіз показує, що процес формування ТЗ може бути істотно покращений за рахунок вдосконалення вузлів сканування, розроблення ефективніших режимів роботи, використання попередньої обробки відеосигналу, застосування схем автоматичної корекції і підбудови та одночасної роботи у кількох спектральних діапазонах з метою поліпшення візуалізації теплового об'єкта.

Не викликає сумнівів, що і надалі ТС на базі піровідників та матричних фотоприймачів широко використовуватимуться в спеціальній техніці, при цьому актуальною залишатиметься проблема безперервного вдосконалення їхніх параметрів, яку можна вирішувати двома шляхами – розробленням нових та модернізацією вже існуючих серійних ТК і систем. Перший шлях дає змогу добитися значних якісних поліпшень параметрів ТС, але він є істотно витратним та потребує значних витрат часу. Другий шлях дає змогу, на перший погляд, добитися скромніших результатів, але забезпечує розв'язання багатьох задач за мінімальних витрат фінансових та часових ресурсів [20].

Необхідно зауважити, що вихідне зображення ТС переважно вимагає покращення через його розмитість, малу яскравість та контрастність, низький рівень кореляції із зображенням, отриманим із видимого діапазону, а отже, як наслідок, – низьку інформативність. Крім того, нині не тільки не існує стандартного програмного забезпечення для ТК, але навіть у фахівців цієї галузі не існує усталеного погляду на те, якою саме повинна бути оптимальна форма подання отриманої інформації, що задовольняла б усі вимоги споживача та відповідала спроможності виробника. Крім того, практично кожна модель ТК формує масив графічних даних у власному специфічному форматі, який не підтримує програмного забезпечення (ПЗ) жодного іншого виробника.

Відомі математичні та програмні методи обробки графічних зображень не відповідають специфіці обробки ТЗ досліджуваних об'єктів, оскільки ТЗ у кожній своїй точці містить корисну інформацію про температурні показники досліджуваного об'єкта і для нього є неприйнятними стандартні методи обробки цифрових зображень, які ґрунтуються на перерахунку або неконтрольованій оператором зміні даних будь-якої окремої точки, а саме зменшення надлишковості зображення, компресія/декомпресія та накладання фільтрів або масок (за винятком випадку, коли йдеться про зображення наперед відомих стаціонарних об'єктів та як фільтр використовується змодельоване відповідно до кінцевої мети дослідження певних параметрів об'єкта або еталонне ТЗ цього досліджуваного об'єкта).

**Висновки.** Аналіз можливих методів підвищення інформативності ТС показав, що з урахуванням вимог практичного використання необхідне опрацювання вихідних ТЗ засобами комп'ютерної техніки, а саме розроблення систем зберігання, корекції, обробки та порівняння ТЗ з попередніми (еталонними) зображеннями досліджуваних об'єктів та із зображеннями, отриманими

паралельно із інших спектральних діапазонів. Використання ПК як складової частини ТС для обробки ТЗ надасть можливість застосовувати специфічні засоби обробки, що відповідатимуть особливостям теплового моніторингу, а також одержувати результати, адекватні за своїми характеристиками світовим розробкам у галузі ТС.

Відповідно постає завдання підвищення інформативності ТЗ, створеного ТС шляхом розроблення спеціального ПЗ, що надасть можливість застосовувати до ТЗ спеціальні процедури комп'ютерної обробки – корекції нерівномірностей та спотворень, отримання різниці та суми кадрів, підсилення та логарифмування, формування контурів зображення, суміщення контурного та теплового зображення, псевдокольорового кодування, розрахунку температури певних ділянок ТЗ, статистичних характеристик ТЗ, перетворення ІЧ-сигнатури на температурну, контрастування та згладжування, зміни масштабу та орієнтації, формування монохромної та кольорової шкал відліку, запам'ятовування отриманих результатів та формування переліку збережених зображень та відомостей про них та, як наслідок, – задача аналізу результатів, одержаних у процесі обробки ТЗ та їхніх числових характеристик і порівняння інформативності роботи поліпшеної ТС із оригінальними даними.

1. Балоев В. Значение фокусного расстояния оптической системы тепловизора, обеспечивающее максимум дальности различения цели // *Фотоэлектроника и приборы ночного видения*. – М.: ОРИОН, 2000. – С.60–61. 2. Богомолов П.А, Сидоров В.И, Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК систем. – М.: Радио и связь, 1987. – 208 с. 3. Бочаров Б. Г., Поваго-Потемкин А. Б. Цифровая оптика в ССТV // *Системы безопасности*. 2007. – № 4. – С. 96–99. 4. Вишневицкий Г., Выдревич М., Нестеров В., Ривкин В. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе: путь к успеху // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 2003, № 8. – С. 18–24. 5. Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения // *Специальная Техника*, 2001, № 6. – С. 16–21. 2002, № 1. – С. 18–26. 6. Гой В.В., Смирнов А.В. Варианты использования профессиональных персональных ЭВМ в тепловизионных системах // *Тепловидение*. Вып.8. – М.: МИРЭА, 1990. – С. 84–89. 7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988, – 216 с. 8. Жуков А.Г., Горюнов А.Н., Кальфа А.А. Тепловизионные приборы и их применение. – М.: Радио и связь, 1983. – 168 с. 9. Колобродов В.Г. Выбор параметров разложения раstra в тепловизорах на пировидиконе // *ОМП*, 1989, №10. – С.15–17. 10. Колобродов В., Шустер Н. Тепловизионные системы. – К.: НТУУ “КПИ”, 2001. – 340 с. 11. Криксунов Л.З. Приборы ночного видения. – К.: Техніка, 1975. – 216 с. 12. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с. 13. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры: Справочник. – К.: Техніка, 1987. – 166 с. 14. Криксунов Л.З., Рабышко В.А. Пириконы. – К.: Техніка, 1984. – 78 с. 15. Костюков Е., Крошин В., Маклаков М. и др. Матричные фотоприёмники с зарядовой связью с временной задержкой и накоплением // *Фотоэлектроника и приборы ночного видения*. – М.: ОРИОН, 2004. – С.139-140. 16. Костюков Е., Кузнецов Ю., Скрылёв А. и др. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью и КМОП-фотоприёмники: состояние и перспективы // *Фотоэлектроника и приборы ночного видения*. – М.: ОРИОН, 2004. – С.8. 17. Куртев Н.Д., Смирнов А.В. О построении унифицированной системы обработки тепловизионной информации // *Тепловидение*. Вып. 4. – М.: МИРЭА, 1982. – С.11–14. 18. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с. 19. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с. 20. Сингер Б. Теория и качественные показатели пироэлектрических передающих трубок // *Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений*. – М.: Мир, Том 3, 1980. – С. 11-90. 21. Ушакова М.Б. Зарубежные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений // *Прикладная физика*, 2004. – № 4. – С.70–78. – № 5. – С.64 – 73. 22. Шурыгина В. КМОП- и ПЗС-датчики изображения: Впереди светлое будущее // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2009. – № 3. – С. 32–39. 23. Ярошенко С. Твердотельные датчики изображения. // *IT News/* – 2007. – № 3. – С. 25–28. 24. 0.9–1.7  $\mu\text{m}$  InGaAs 256 & 512 pixels Linear Arrays [Electronic resource]: XenlCs, 2003. – Mode of access: [www.XenlCsvimi.com](http://www.XenlCsvimi.com). – Last access: 2007. – Title from the

screen. 25. Litwiller D. CCD vs CMOS: facts and fictions // *Photonics spectra*. Laurin Publishing Co. Inc. – 2001. – № 1. – P. 18–21. 26. Memis G.O., Mohseni H. Inspired by nature, IR detector targets long-wavelength applications // *Laser Focus World*, April, 2007. – P. 75–78. 27. *Uncooled infrared imaging arrays and systems*. Edited by Skatrud D., Kruse P. // *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 47, Academic Pr., 1997. – 314 p.

УДК 621.397+681.723

Ю.М. Матієшин

Національний університет “Львівська політехніка”

## ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ МІКРООБ’ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СКАНУВАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА

© Матієшин Ю.М., 2010

**Розглядаються питання використання телевізійного сканувального оптичного мікроскопа для дослідження різних типів динамічних мікрооб’єктів з метою визначення основних параметрів цих мікрооб’єктів. Описано особливості побудови телевізійного сканувального оптичного мікроскопа для різних біологічних та медичних досліджень.**

**Questions of use of a television scanning optical microscope for research of various types of dynamic microobjects are considered with the purpose of definition of key parameters of these microobjects. It is described features of a structure of a television scanning optical microscope for various biological and medical researches.**

**Вступ.** Завдання, пов’язані із динамічними мікрооб’єктами (МО), досить успішно розв’язуються переважно програмно у камерній мікроскопії [1, 2]. В цих роботах розглядаються: 1) аналіз переміщення та рухливості МО; 2) методика виявлення та утримання МО у полі зору мікроскопа; 3) аналіз зображень для отримання надійних та відтворюваних даних про кількість, положення, фазу руху та швидкість МО у мікробіології та медицині. Аналізуються такі основні групи динамічних МО: 1) мікроорганізми, 2) структурні елементи крові, 3) клітини у ракових пухлинах; 4) живі клітини організму; 5) елементи мікрооптичних та мікроелектромеханічних систем (наприклад, мікродзеркальні дисплеї або деталі годинникових механізмів); 6) потоки частинок [3, 4] тощо.

Важливість завдань дослідження МО зумовлена великою потребою удосконалення методик дослідження живих організмів у таких галузях, як медицина та біологія. Зокрема, у медицині необхідно вивчати динаміку рухливості клітин у ракових пухлинах, що відповідає активності розвитку хвороби і швидкості появи новоутворень. Не менш важливим є розв’язання великої кількості задач, пов’язаних із аналізом клітин крові та штучним заплідненням.

**Типи динамічних МО, придатних для дослідження методами телевізійної сканувальної оптичної мікроскопії.** Телевізійний сканувальний оптичний мікроскоп (ТСОМ) дає змогу досліджувати об’єкти живої та неживої природи із розмірами від часток мікрметра до часток міліметра, що здійснюють певний рух і, отже, можуть характеризуватися основними параметрами руху. До основних параметрів руху МО належать швидкість, прискорення та траєкторія руху.

Прикладами таких МО (рис. 1) є клітини крові (КК): еритроцити, лейкоцити та тромбоцити (розмір 2...22 мкм [5]); атипові живі клітини (АЖК) (розмір, наприклад, ракових клітин 20...80 мкм