

УДК 621.384.3 (045)

Ю. П. Мисюк, канд. техн. наук
 Науково-дослідний інститут
 Державної прикордонної служби
 України
 e-mail: julia.mysiuk@gmail.com

ТЕПЛОВІЗОРИ ЯК СУЧАСНІ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ОХОРОНИ ДЕРЖАВНОГО КОРДОНУ

Вступ. Одними з основних завдань національної безпеки України є захист державних кордонів, протидія таким правопорушенням як незаконна міграція, переміщення наркотичних речовин, контрабанда зброї, ведення незаконного промислу в виключній морській економічній зоні. Для надійного захисту інтересів держави від зазначених загроз Державна прикордонна служба України повинна мати потенціал, який дозволить не тільки ліквідувати прояви такої протиправної діяльності, але й, що є більш важливим, буде спроможна превентивно попереджувати прояви таких загроз на державному кордоні.

З метою приведення системи охорони державного кордону України до європейських стандартів та забезпечення ефективної протидії сучасним загрозам національній безпеці на державному кордоні продовжується робота щодо удосконалення оперативно-службової діяльності прикордонних підрозділів. Аналіз діяльності прикордонних структур показує, що значимим компонентом прикордонної служби є технічне забезпечення охорони кордону із залученням усіх видів спостереження в пунктах пропуску та уздовж лінії державного кордону.

Одним із способів підвищення надійності охорони державного кордону є удосконалення системи спостереження з використанням приладів візуального спостереження. Однак дальність дії приладів нічного бачення (далі – ПНБ) уночі значною мірою залежить від зовнішніх умов, найважливішими з яких є освітленість, обумовлена випромінюванням нічного неба, оптико-фізичних характеристик фонів і цілей, прозорістю атмосфери. Коли ж немає можливості забезпечити достатню освітленість уздовж усього державного кордону або території, що охороняється, то є сенс використовувати тепловізійні системи, що, як правило, поєднують у собі телевізійну камеру, яка здатна виконувати свої функції при низькому рівні освітленості, безпосередньо тепловізор та лазерний далекомір. Тепловізійна система повинна мати гіроскопічну стабілізацію та працювати у комплексі з системою супутникової навігації GPS, прожектором, системою передачі даних телеметрії на наземний пункт у реальному масштабі часу, відеомагнітофоном, системою виведення інформації на плоскі рідко-кристалічні монітори.

Слід зазначити, що тепловізори дають змогу ефективно контролювати державний кордон та боротися з протиправною діяльністю у будь-який час доби та за будь-яких погодних умов. Типове застосування тепловізорів – охорона кордону, де основна загроза, як правило, виникає уночі.

Відмінність тепловізорів від попередників, а саме від ПНБ, полягає у тому, що вони не потребують відбитого видимого або короткохвильового інфрачервоного (далі – ІЧ) випромінювання, а використовують власне ІЧ випромінювання об'єктів. ІЧ діапазони 3–5,5 і 7–14 мкм є робочими зонами тепловізійного методу контролю.

Слід зазначити, що особливий інтерес викликає більш інформативний діапазон 8–14 мкм, що повністю співпадає з найбільш широким вікном прозорості атмосфери і відповідає максимальній випромінювальній здатності об'єктів спостереження в температурному діапазоні від –50 до +500 °С.

Тепловізійний метод контролю ґрунтується на тому, що будь-які процеси, які відбуваються у природі і людській діяльності, супроводжуються поглинанням і виділенням тепла, змінюючи внутрішню енергію тіла, яка в стані термодинамічної рівноваги пропорційна температурі речовини. У результаті цього поверхні фізичних тіл набувають специфічного температурного розподілу. Прилади, що здійснюють перетворення власного теплового випромінювання об'єктів і місцевості (фону) у видиме зображення, називають тепловізорами або термовізорами.

Аналіз досліджень і публікацій. Початок розвитку тепловізійної техніки було покладено на початку 60-х років 20-го століття дослідженнями та розробкою приладів за двома основними напрямками: з використанням дискретних приймачів випромінювання спільно з системами сканування (розгортки) зображення і апаратури без механічного сканування на базі двовимірних ІЧ приймачів. Сьогодні можна умовно виділити чотири покоління розвитку такої техніки [1].

Нульове покоління засноване на застосуванні одиничних охолоджуваних приймачів і двовимірної (малої та кадрової) розгортки за допомогою скануючої оптико-механічної системи; перше покоління – на застосуванні малих 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 цілі. Нове третє покоління тепловізійної техніки засноване на застосуванні фокально-площинних, двовимірних твердотільних багатоелементних (матричних) приймачів випромінювання (далі – МПВ).

В останні роки розвиток тепловізійної техніки йде в основному шляхом застосування неохолоджуваних багатоелементних МПВ, фізичні характеристики яких високі і практично не поступаються системам охолодження. Сучасні тепловізійні системи (далі – ТВС) мають малі вагогабаритні характеристики і енергоспоживання, забезпечують безшумну роботу і високу якість тепловізійного зображення, широкий динамічний діапазон при роботі в режимі мовного телевізійного стандарту, цифрову обробку в реальному масштабі часу, зв'язок з ПЕОМ і т.п. і поділяються на два основні класи [1]: наглядові (пошукові); вимірювальні або радіометричні (термографи).

Наглядові (пошукові) ТВС призначені для виявлення, розпізнавання і візуалізації на тлі теплових перешкод віддалених тепловипромінюючих об'єктів (цілей). Такі системи можуть доповнюватися різними каналами і містять, як правило, телевізійний канал, канал нічного бачення, канал лазерної локації для виявлення телефотооптики на значних відстанях, вимірювальний канал – лазерний далекомір. Таке доповнення наглядових ТВС дозволяє їм частково виконувати вимірювальні функції. Вимірювальні (радіометричні) ТВС використовуються переважно для кваліфікованої теплової діагностики різних промислових об'єктів, техніки, будинків, споруд, механізмів тощо. Кожен з цих класів ТВС має свою специфіку практичного застосування і свої експлуатаційні можливості.

Постановка завдання. Знання персоналом прикордонного підрозділу будови та особливостей функціонування тепловізорів є основою їх якісного застосування при виконанні завдань під час оперативно-службових дій. Тому розглянемо загальну будову та роботу тепловізора.

Фізична основа, будова, принцип дії і класифікація тепловізорів. Фізичною основою для створення тепловізора послужив ефект, пов'язаний із здатністю деяких

речовин (матеріалів) змінювати свої електричні властивості (зокрема провідність) під впливом електромагнітного випромінювання в ІЧ діапазоні [2].

Сучасний тепловізор має досить просту будову і складається з оптичної системи (об'єктива), що фокусує тепловий потік від об'єкта на чутливий елемент (тепловізійну матрицю) – приймач інфрачервоного випромінювання, і електронного блоку обробки (посилення) сигналу, для подання теплової карти (термограми) об'єкта у вигляді, зручному для аналізу [2]. Матриця – це ґратка мініатюрних детекторів, що приймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після посилення перетворюються у відеосигнал.

Найбільш складним елементом у структурі тепловізорів є його об'єктив. Головною вимогою до об'єктива тепловізора є прозорість для ІЧ випромінювання. Тому для виготовлення тепловізійних об'єктивів використовується дорогий матеріал – германій, який пропускає тільки потрібний спектр випромінювання. На сьогоднішній день вартість об'єктива складає приблизно 45 % вартості усєї тепловізійної камери, ще 45 % вартості складає термочутлива матриця. Термочутливі матриці розташовують у фокусі об'єктива. Якість матриці суттєво визначає здатність приладу виконувати свої функції. Матриця тепловізора складається з окремих термочутливих елементів, що змінюють свої електричні властивості пропорційно ступеню їх нагрівання під впливом ІЧ випромінювання об'єктів.

Існують охолоджені та неохолоджені матриці. Охолоджені матриці чутливіші, дорогі та масивні, адже для охолодження використовуються криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температури $-210\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такі матриці побудовані на основі явища зовнішнього фотоелектричного ефекту, тобто випромінювання електронів під впливом ІЧ випромінювання від об'єктів. При цьому у якості світлочутливої речовини тепловізійної матриці використовують телуриди з вузькозонних напівпровідників [2].

Чутливість охолодженої матриці є достатньо високою, адже в результаті охолодження її температура стає значно нижчою температури об'єктів спостереження. Температурна чутливість такої матриці, тобто здатність реєструвати різницю температур, становить від $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на відстанях до 3 км. У результаті формуються зображення високої якості. Недоліками камер з охолоджуваними матрицями є велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, висока вартість, а також те, що охолодження матриці до робочої температури займає зазвичай кілька хвилин.

Неохолоджені матриці, у свою чергу, на порядок дешевші у виготовленні, компактніші, але ціною цього є їх понижена чутливість. Неохолодженою матрицею є пластина, яка складається з безлічі мікроболометрів. В основі роботи мікроболометрів лежить явище внутрішнього фотоелектричного ефекту (фотоелектричність), тобто вони реєструють зміну опору чутливого елемента під впливом ІЧ випромінювання об'єктів. Таким чином, кожен окремий мікроболометр являє собою окремий піксель матриці. Чим більша кількість мікроболометрів у матриці, тим чіткіше буде зображення, але й складніше та дорожче сам прилад. Їх перевага – вони починають працювати одразу після включення, мають тривалий термін служби і низьке споживання енергії, простота і відносна дешевизна.

За принципом дії залежно від типу чутливого елемента приймачі ІЧ випромінювання поділяються на [3]: болометричні, піроелектричні, термоелектричні та фотонні.

У сучасних тепловізорах використовуються болометричні і фотонні приймачі ІЧ діапазону. Болометр являє собою резистор, у якого змінюється опір залежно від потужності падаючого на нього теплового потоку. З елементарних болометрів

формується болометричні матриці. Найбільшого поширення знаходять болометричні матриці на оксиді ванадію і на аморфному кремнії. Такі матриці не потребують охолодження. Спектральна чутливість таких матриць однакова і знаходиться у діапазоні від 1 до 14 мкм. Болометричні матриці відрізняються порівняно великою неоднорідністю параметрів і характеристик елементарних мікроболометрів в матриці, нелінійністю їх характеристик, високим рівнем шумів і низькою, порівняно з фотонними приймачами, здатністю виявляти об'єкти.

Для суттєвого поліпшення якості зображення в тепловізійних системах на основі мікроболометричних матриць потрібні спеціальні алгоритми калібрування, усереднення, накопичення, заміщення дефектних елементів матриці, компенсації шумів, підвищення контрасту. Їм також потрібні спеціальні засоби компенсації власного теплового випромінювання та обробки вимірюваних значень. Постійна часу болометрів змінюється від 10^{-1} до 10^{-3} (менша для матриць на основі аморфного кремнію і більша для матриць на основі оксиду ванадію).

Головною перевагою неохолоджуваних мікроболометричних матриць є відсутність охолодження і однакова спектральна чутливість в діапазоні, що застосовується.

Приймачі на основі фотоэффекту, що представляють найбільший комерційний інтерес, випускаються в основному на базі антимоніду індію (InSb), (кадмій – ртуть-телур) HgTeCa, PbSe. Приймачі на базі InSb, PbSe працюють у діапазоні 3–5 мкм, а приймачі на базі HgTeCa – у діапазоні 8–14 мкм.

Головним недоліком приймачів на основі фотоэффекту є необхідність охолодження до низьких температур (як правило, з використанням рідкого азоту), що створює певні обмеження при використанні у віддалених малонаселених місцях. Спектральна чутливість таких приймачів на 1–2 порядки вище болометричних, проте вони мають обмежений спектральний діапазон чутливості з явно вираженим максимумом. Постійна часу приймачів на основі фотоэффекту змінюється від 10^{-5} до 10^{-6} , тобто їх можна застосовувати для термографування рухомих об'єктів.

Незважаючи на більш низьку чутливість, неохолоджувані мікроболометричні матриці отримали найбільше застосування для використання в тепловізорах, оскільки такі тепловізори практично завжди готові до роботи і відсутні вимоги щодо безпеки при роботі з рідким азотом.

Принцип роботи тепловізорів полягає у тому, що вони "бачать" не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання людей і предметів. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури. Принцип дії тепловізора такий [2]: інфрачервоне (теплове) випромінювання від об'єкта спостереження через оптичну систему передається на приймач, що являє собою неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки оцифровується і відображається на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. Тобто фізична картина фотоэффекту така: ІЧ фотони, потрапляючи на поверхню вузькозонного напівпровідника (HgCdTe, InSb), переводять носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІЧ випромінювання стає просто непомітною. Теплова картинка об'єкта, що відображається на екрані, може бути у вигляді монохромного або кольорового зображення [4].

Ще з початку розвитку тепловізійних приладів намітилися дві тенденції. До першої групи приладів відносяться тепловізори, в яких для перетворення оптичного сигналу ІЧ діапазону в електричний сигнал використовується принцип оптико-механічного сканування (ОМС), а до другої групи приладів – тепловізори з електронним скануванням. У тепловізорах першого типу використовуються одноелементні або багатоелементні ІЧ приймачі випромінювання (ПВ) миттєвої дії, а в тепловізорах другого типу у якості ПВ використовуються ІЧ відікони, пірікони, а зараз уже й матричні приймачі випромінювання, так звані фокальні матриці, що працюють у режимі накопичення зарядів і базуються на різних фізичних явищах.

Більшість сучасних тепловізійних приладів побудовані за першим принципом, але у зв'язку з успіхами в технології виробництва матричних приймачів випромінювання з'явилися прилади без оптико-механічного сканування, які перевершують прилади першого типу за споживчими властивостями [5].

На рис. 1 представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІЧ матрицею.

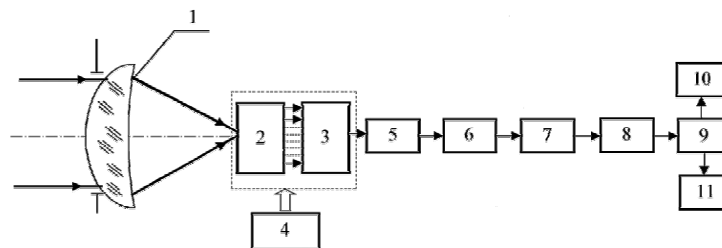


Рис. 1. - Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею:
1 – оптична система; 2 – фокальна матриця з підсилювачами; 3 – мультиплексор;
4 – система охолодження; 5 – коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів;
6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – цифровий коректор неоднорідності;
8 – коректор непрацюючих осередків; 9 – формувач зображення;
10 – дисплей; 11 – цифровий вихід.

Фокальні матриці виготовляються як функціонально закінчені фотоприймачі (ФП), що включають систему охолодження, підсилювачі, мультиплексор, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки і формувач вихідних сигналів. Сигнали з виходу такого ФП можуть передаватися на відеоконтрольний пристрій (ВКП) телевізійного типу або у цифровому вигляді в блоки цифрової обробки. На рис. 2 представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з системою ОМС.

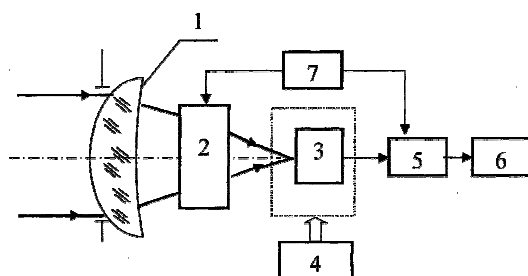


Рис. 2. - Узагальнена функціональна схема скануючого тепловізора

Система ОМС, у загальному випадку, повинна забезпечувати огляд простору предметів – сканування, як у напрямку рядків (по горизонту), так і по кадру (у вертикальному напрямку).

- 1 – оптична система;
- 2 – блок оптико-механічного сканування;
- 3 – приймач випромінювання;
- 4 – система охолодження;
- 5 – електронний тракт;
- 6 – пристрій відеоконтролю;
- 7 – система синхронізації.

Існує безліч схем скануючих тепловізорів, що розрізняються методами сканування, обробки сигналів і подання вихідного зображення. Ці відмінності загалом обумовлені топологією ПВ, що використовуються в тих чи інших приладах. Зокрема, в тепловізорах з системами ОМС можуть використовуватися одноелементні, а також багатоелементні ПВ у вигляді лінійок або матриць. Крім цього, у якості пристрою відеоконтролю, крім ТВ-моніторів, що широко застосовуються, використовуються різного роду пристрої з лініями світлодіодів та оптико-механічними системами розгортки [5].

Розрізняють такі методи сканування простору предметів і розгортки при формуванні вихідного зображення: послідовне, паралельне і паралельно-послідовне. При послідовному скануванні або розгортці здійснюється зміна напрямку візирної осі і перетворення сигналу по черзі уздовж кожного рядка зображення з наступним переходом на кожний наступний рядок. Таке сканування або розгортка можуть здійснюватися при використанні одноелементних ПВ або світлодіодів, а також ПВ або світлодіодів у вигляді лінійок, елементи яких орієнтовані уздовж рядка.

При паралельному скануванні або розгортці площі ПВ або лінійки світло діодів, орієнтованих перпендикулярно до напрямку руху візирної осі. При паралельно-послідовному скануванні або розгортці використовуються ПВ і лінійки світлодіодів у вигляді матриць, а огляд поля проводиться послідовно по зонах.

Відповідно до найбільш доцільних поєднань типів сканування, обробки сигналів та розгортки тепловізійні прилади з системами ОМС будують на основі наступних чотирьох основних принципів:

- паралельне сканування, паралельна обробка відеосигналів і паралельна розгортка;
- паралельне сканування, паралельна обробка сигналів з наступним їх перетворенням (мультиплексуванням) для виведення зображення на ТВ-монітор;
- паралельно-послідовне сканування і розгортка з паралельною обробкою сигналів;
- послідовна обробка сигналів з перетворенням сигналу для виведення на ТВ-монітор.

Існує широкий ряд моделей тепловізорів та програмного забезпечення для розв'язання різноманітних проблем забезпечення безпеки. На ринку доступні моделі наступних класів: ручні, ближньої дії (до 500 метрів), середньої (до 5 кілометрів) і далекої (більше 5 кілометрів). Окремим класом стоять комплексні системи, поєднані з CCD-сенсором, GPS, лазерним далекоміром і т.п. Сьогодні на ринку систем телеспостереження доступна широка лінійка продуктів, починаючи від портативних ручних тепловізорів для бригад оперативного реагування до далекодіючих комплексних систем з дистанцією детектування 50 км.

Прилади з ультрашироким (180°) полем зору здатні перекривати дистанцію в 400 м і детектувати вторгнення з відстані в 200 м. Завдяки своїм характеристикам їх можна застосовувати у якості альтернативи класичним системам охорони периметра. Крім того, такі прилади мають усі переваги тепловізійного методу охорони.

Слід зазначити, що тепловізійна техніка має ряд переваг і властивих тільки їй можливостей, а саме:

- виявлення віддалених тепловипромінюючих об'єктів (або цілей) незалежно від рівня природної освітленості, а також, до певної міри, теплових або інших перешкод (диму, дощу, туману, снігу, пилу і т.п.);
- можливість цілодобового спостереження;
- безшумність і пасивний принцип роботи;
- велика швидкодія, малі габарити й енергоспоживання;

- можливість цифрової обробки зображення у реальному масштабі часу.

До недоліків тепловізорів необхідно віднести високу вартість, що є наслідком застосування дорогих матеріалів, передових технологій під час виробництва. Це, у свою чергу, визначає необхідність використання їх кваліфікованим персоналом.

Висновки. Резюмуючи вищесказане, можна стверджувати, що тепловізійна техніка стає необхідним компонентом комплексу систем безпеки і на сьогодні активно застосовується як високоефективний засіб ведення спостереження.

Без сумніву, ефективне використання тепловізора визначається раціональністю вибору конкретної моделі або модифікації в залежності від необхідних технічних характеристик. Слід зазначити, що на ділянках підрозділів охорони державного кордону, де використовуються прожекторні станції, сигнальні пістолети, необхідно передбачити такий режим використання тепловізорів, що не призводитиме до "вигорання" окремих зон термочутливої матриці.

Таким чином, тепловізійні прилади і системи необхідні для забезпечення безпеки об'єктів, розташованих на протяжних територіях, наприклад, на великих підприємствах, родовищах, авіаційних і морських портах, військових об'єктах і державному кордоні. Перспективи розвитку систем відеоспостереження стосовно завдань охорони периметра лежать, в основному, у подальшому розвитку відеоаналітики.

Література

1. Как работают тепловизионные системы [Электронный ресурс] / Научно-производственный центр антитеррористической и криминалистической техники. – Режим доступа : <http://www.spektr-at.ru/catalogue/teplo/howto.html>
2. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів» / [С.С.Антоненко, Е.В.Колісніченко]. - Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 199 с.
3. Тепловізори. Принцип работы [Электронный ресурс] / Испытательная лаборатория теплового неразрушающего контроля. – Режим доступа: http://aosyst.kz/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid=69
4. Царьов Ю. О. Засоби візуального спостереження охорони державного кордону : навч. посібник / Ю. О. Царьов, Д.А. Купрієнко. – Хмельницький: Вид-во НАДПСУ, 2010.
5. Колочкин В. Я. Тепловизионные приборы и системы: учеб. пособие / В.Я. Колочкин, Г.М. Мосягин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 60 с.

ТЕПЛОВИЗОРИ КАК СОВРЕМЕННЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОХРАНЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ

Ю. П. Мисюк

Рассмотрены физическая основа, устройство, принцип действия и классификация тепловизоров. Проведен анализ технических возможностей тепловизоров. Проанализировали эффективность использования тепловизоров для охраны государственной границы.

THERMAL IMAGING DEVICES HOW MODERN INTEGRATED EQUIPMENT PROTECTION OF STATE BORDER

Iu. P Mysiuk

The physical basis of the device, the operating principle and classification of thermal imaging devices. The analysis of the technical capabilities of thermal imaging devices. The effectiveness of using thermal imaging devices for the protection of state borders.