

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-8>

УДК: 621.384.3

КОНОТОПЕЦЬ Микола

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6963-1877>

e-mail: nikolyalux@gmail.com

ТУРОВСЬКИЙ Олександр

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0002-4961-0876>

e-mail: s19641011@ukr.net

САМОЙЛОВ Ігор

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-8251-9257>

e-mail: samoilov1966igor@gmail.com

КОМОНЮК Євген

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0000-9901-3423>

e-mail: skrinnya@protonmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ НЕГЛАСНОГО ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОБ'ЄКТАХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

В умовах постійного удосконалення методів та способі застосування засобів негласного отримання інформації на об'єкті інформаційної діяльності актуальним є питання їх своєчасної ідентифікації, виявлення та нейтралізації. В статті розглянуто перспективи та можливості виявлення таких засобів за допомогою програмно-апаратних комплексів на основі тепловізорів по тепловому випромінюванню.

В результаті проведених досліджень в статті подано результати аналізу основних технічних характеристик сучасних зразків тепловізорів, що споряджені мікроболометричними матрицями провідних компаній світу. Розроблено формалізовану модель теплового каналу витоку інформації на ОІД за енергетичним критерієм та на її основі запропоновані пропозиції з удосконалення технічних характеристик тепловізійних пристроїв. Надані пропозиції спрямовані на покращення ефективності використання тепловізійних пристроїв у виявленні та захисті від потенційних загроз, що походять з радіоелектронних засобів добування інформації. Показано, що подані пропозиції підвищують якість виявлення та нейтралізації радіоелектронних засобів добування інформації, які о можуть бути використані зловмисником на ОІД.

Практична цінність результатів дослідження полягає в підвищенні якості виявлення та нейтралізації роботи радіоелектронних засобів добування інформації, що можуть бути використані на ОІД при проведенні спеціальних досліджень шляхом покращення роботи тепловізійних пристроїв.

Ключові слова: радіоелектронні засоби добування інформації, тепловізор, температурне поле, тепловий технічний канали витоку інформації, апаратно-програмний комплекс, індикатиси теплового випромінювання.

KONOTOPETS Mykola, SAMOYLOV Igor, KOMONYUK Yevhen

Institute of Special Communications and Information Protection
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TUROVSKY OLEKSANDR

State University of Information and Communication Technologies

PROSPECTS FOR THE USE OF THERMAL IMAGERS FOR DETECTING RADIOELECTRONIC MEANS OF COVERT INFORMATION RETRIEVAL AT INFORMATION ACTIVITY SITES

In the conditions of constant improvement of methods and methods of application of means of covert information obtaining at the object of information activity, the issue of their timely identification, detection and neutralization is relevant. The article considers the prospects and possibilities of detecting such means using software and hardware complexes based on thermal imagers by thermal radiation.

As a result of the research conducted, the article presents the results of the analysis of the main technical characteristics of modern samples of thermal imagers equipped with microbolometric matrices of leading companies in the world. A formalized model of the thermal channel of information leakage at the OIAD according to the energy criterion has been developed and on its basis proposals have been made for improving the technical characteristics of thermal imaging devices. The proposals provided are aimed at improving the efficiency of using thermal imaging devices in detecting and protecting against potential threats originating from radio-electronic means of information extraction. It is shown that the proposals provided increase the quality of detection and neutralization of radio-electronic means of information extraction, which can be used by an attacker on the OIAD.

The practical value of the research results lies in improving the quality of detection and neutralization of the work of radio-electronic means of information extraction, which can be used on the OIД when conducting special studies by improving the operation of thermal imaging devices.

Keywords: radio-electronic means of information extraction, thermal imager, temperature field, thermal technical channels of information leakage, hardware and software complex, thermal radiation indicators.

ВСТУП І ФОРМУЛЮВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ПРОБЛЕМИ.

В сучасних умовах посилення інформаційної боротьби та удосконалення методів негласного проникнення на об'єкти інформаційної діяльності (ОІД) з метою несанкціонованого доступу до конфіденційних інформації актуальним завданням є удосконалення методів запобігання витоку конфіденційних даних через технічні канали витоку конфіденційних даних. До таких каналів в основному відносять канали, через які несанкціоновано витікає акустична (голосова) інформації та відеоінформація в приміщеннях; телефонні переговори; інформації, що обробляється в спеціальних технічних засобах; комп'ютерних мережах, факсах, ксероксах і ін. Одним з ефективних способів доступу до таких каналів є приховане розміщення на об'єкті інформаційної діяльності технічних засобів негласного отримання інформації (ЗНОІ), одним з видів яких є радіозакладні пристрої (РЗП).

Виходячи з даних обставин, актуальним напрямком забезпечення захисту інформації на об'єкті інформаційної діяльності є вчасна індикація, виявлення та нейтралізація вказаних ЗНОІ.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Функціонування всіх технічних засобів і систем обробки та передачі інформації, зокрема й ЗНОІ, майже завжди супроводжується побічними ефектами, які можуть призводити до витоку даних. Зазвичай це випромінювання електромагнітних або акустичних полів, що містять потенційно конфіденційну інформацію, їх наведення на сторонні провідники, предмети та технічні засоби, а також будівельні конструкції приміщень, що мають електричний або механічний зв'язок із зовнішнім середовищем. Небезпечні сигнали можуть проникати у відповідні електричні ланцюги, електромережу, заземлення тощо.

Таким чином, з точки зору індикації та виявлення, засоби обробки інформації та ЗНОІ можна розглянути як технічні пристрої, які одночасно формують побічні випромінювання в різних спектрах, які дозволяють отримати доступ до конфіденційних даних та по факту наявності випромінювання провести індикацію наявності такого пристрою в зонах обробки конфіденційної інформації.

Питанню вирішення наукового завдання по виявленні ЗНОІ в радіоелектронному та електромагнітному спектрі присвячено ряд робіт [1-3]. Їх аналіз показує, що дане завдання має свої перспективи до вирішення і дослідження в цьому напрямку активно розвиваються.

Одночасно з цим, питання індикації та виявлення ЗНОІ в тепловому полі випромінювання на достатньому рівні не розглядалося та представляє певний науково-технічний інтерес. В межах вирішення визначеного завдання ЗНОІ можна розглянути, як радіоелектронний пристрій, який в процесі роботи виділяє певну кількість теплової енергії, по наявності та рівню якої такий ЗНОІ можна ідентифікувати та виявити.

Значною проблемою у виявленні теплового каналу витоку інформації є складність побудови ЗНОІ як об'єктів контролю. Такі пристрої зазвичай складаються з різних матеріалів, що мають різні коефіцієнти випромінювання, а також характеризуються високою щільністю компонування. Це може спричинити підсилення ефекту взаємного відбиття та несиметричного розподілу теплових хвиль всередині контрольованого об'єкта, що значно ускладнює теоретичні розрахунки його теплового режиму. Враховуючи ці фактори, пріоритетними стають безконтактні методи індикації ЗНОІ, зокрема дистанційне вимірювання температури за допомогою тепловізорів.

У сфері мікроелектроніки спостерігається тенденція до мініатюризації пристроїв та зниження температури їхніх поверхонь, що випромінюють тепло. Це досягається використанням матеріалів із низьким коефіцієнтом випромінювання та застосуванням екрануючих конструктивних елементів, що зменшують індикатрису теплових випромінювань. Однак такі заходи можуть знижувати чутливість приймальних пристроїв, які використовуються для виявлення ЗНОІ та РЗП по тепловому випромінюванню, що, у свою чергу, може сприяти несанкціонованому збору інформації на об'єктах інформаційної діяльності (ОІД).

Дані обставини зумовлюють необхідність удосконалення пошуково-доглядової апаратури для виявлення ЗНОІ та РЗП. Завдання ускладнюється швидким розвитком радіоелектронних компонентів, що можуть використовуватися в засобах прихованого збору інформації, а також впровадженням нових технологій, які забезпечують мініатюризацію пристроїв і зменшення їхніх демаскуючих ознак. Розміщення компактних ЗНОІ та РЗП у важкодоступних місцях або на об'єктах із високою щільністю матеріалів додатково ускладнює їхнє виявлення. Одночасно з цим зростання обчислювальної потужності та алгоритмічної складності сучасних радіоелектронних засобів робить необхідним розробку та вдосконалення апаратно-програмних рішень для ефективного контролю теплового каналу витоку інформації. Ці виклики потребують активного пошуку нових підходів і технологій, спрямованих на нейтралізацію загроз, пов'язаних із тепловими каналами витоку інформації на ОІД.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Питанням виявлення ЗНОІ та РЗП по тепловому випромінюванню було присвячено ряд робіт, найбільш показовими з яких є [1-3].

У дослідженні [1] авторами було розглянуто особливості інфрачервоної розвідки. Зокрема, визначено поняття співвідношення «сигнал/шум» та ймовірності виявлення для цього виду розвідки. Також представлено описові моделі каналів витоку інформації, що стосуються інфрачервоної розвідки, та наведено їх математичну інтерпретацію.

В науковій публікації [2] авторами В. Г. Колобродовим, В. І. Микитенко, Є. Г. Балінським були розглянуті методи математичного моделювання оптико-електронних систем дистанційного спостереження інфрачервоного діапазону спектру, що працюють в автоматичному режимі або сумісно з оператором, а також методи визначення основних характеристик таких систем.

У науковій роботі [3], колективом авторів під керівництвом Гурі Мордехая продемонстровано Bit Whisper – метод подолання повітряного прошарку між сусідніми зламаними комп'ютерами шляхом використання їх теплового випромінювання та вбудованих теплових датчиків для побудови прихованого каналу зв'язку.

Ураховуючи вище зазначене, дослідження підвищення якісних характеристик тепловізорів щодо індикації та виявлення можливо впроваджених ЗНОІ та РЗП на ОІД в сучасних умовах є актуальним науковим завданням.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета статті полягає в підвищенні ефективності індикації, виявлення та нейтралізації роботи можливо впроваджених ЗНОІ та РЗП на ОІД в сучасних умовах.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання дослідження:

- проведено порівняльний аналіз основних технічних характеристик сучасних зразків тепловізорів, що споряджені мікроболометричними матрицями провідних компаній світу;
- розроблено формалізовану модель теплового каналу витоку інформації на ОІД за енергетичним критерієм;
- на основі отриманої формалізованої моделі теплового каналу витоку інформації на ОІД, яка враховує фізичні характеристики приймача та узагальнену чутливість та ефективність роботи тепловізорів визначено пропозиції з їх удосконалення;
- запропоновано упорядковану послідовність дій при термографічному контролі ОІД.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Будь-які радіоелектронні пристрої, незалежно від їхніх розмірів і функціонального призначення, містять у своєму складі друковані плати, провідники та напівпровідникові елементи, такі як діоди, транзистори та мікросхеми. Під час роботи ці компоненти не лише споживають енергію, але й виділяють її у вигляді тепла, швидкість розсіювання якого пропорційна різниці температур між кристалом і навколишнім середовищем. Завдяки цьому завжди існує температурний контраст між радіоелектронним пристроєм і фоном. Аналізуючи довжину хвилі прийнятого інфрачервоного випромінювання за допомогою тепловізора, можна ідентифікувати пристрій та визначити, до якого з відомих типів він належить [1]:

- 0,9...3,0 мкм (SWIR) – короткохвильовий ІЧ-діапазон (присутнє відбите випромінювання об'єктів);
- 3,0...5,0 мкм (MWIR) – середньохвильовий ІЧ-діапазон (присутнє власне випромінювання об'єктів);
- 8,0...14,0 мкм (LWIR) – довгохвильовий ІЧ-діапазон (інтенсивне випромінювання (присутні як відбите, так і власне випромінювання об'єктів)).

Таким чином, температурне поле поверхні об'єкта містить інформацію про особливості процесу теплопередачі. Спроби замаскувати такі пристрої в навколишньому середовищі неминуче порушують його структуру, оскільки змінюється щільність матеріалів, що використовуються для маскування. Навіть при ретельному приховуванні це призводить до відмінностей у ступені теплового випромінювання між маскуючим шаром, потенційно впровадженими радіоелектронними засобами знімання інформації на ОІД і природним фоном. Інтенсивність таких випромінювань залежить від матеріалу, температури, вологості, стану поверхні маскуючого шару та інших факторів.

Одним із прикладів таких пристроїв є інноваційний інтерфейсний радіочастотний модуль FEM (Front-End Module), наприклад, Broadcom AFEM-8072. Він являє собою комплекс пристроїв, що інтегрує всі кола між антеною та приймачем, включаючи високочастотний фільтр, підсилювач, гетеродин, змішувач і кілька перемикачів. Основне призначення цього модуля — захист вхідних каскадів від насичення потужними позасмуговими сигналами. Він також використовується для перемикання між радіосигналом і основною смугою частот у бездротових системах та радіостанціях із частотною модуляцією (ЧМ) для кодування та декодування сигналів під час передачі.

Прикладом пристрою, що використовує подібний модуль, є маршрутизатор ROG Rapture GT-AXE11000 від ASUS. Він підтримує три одночасно працюючі частотні діапазони, забезпечує з'єднання Wi-

Fi 6E (802.11ax) із максимальною швидкістю до 11 Гбіт/с, а також агрегацію бездротових локальних мереж для дротового підключення зі швидкістю до 2 Гбіт/с. Завдяки 4-ядерному процесору, підтримці Wi-Fi 6 і портам дротової локальної мережі 2,5 Гбіт/с, цей маршрутизатор гарантує стабільну швидкість не менше 1 Гбіт/с, що забезпечує мультигігабітну продуктивність. Інноваційні радіочастотні модулі знайшли широке застосування в побутовій електроніці, автомобільній промисловості, військовій техніці, бездротових засобах зв'язку, інтелектуальних термостатах, пристроях Інтернету речей, системах розумного освітлення, датчиках та розширювачах частотного діапазону.

В залежності від свого призначення відомі наступні типи тепловізорів: вимірювані, спостереження, пірометричні. В свою чергу відмінність другого виду тепловізорів полягає в тому, що вони показують тільки градієнти температур об'єкта.

Вимірювальні тепловізори дозволяють виміряти значення температури заданої точки об'єкта з точністю до коефіцієнта випромінювання EMS.

Для аналізу теплового випромінювання, як правило, використовуються спеціальні датчики – болометри, які являють собою матрицю мініатюрних тонкоплівкових терморезисторів (довжина хвиль 7...14 мкм).

На відміну від пірометра, який вимірює температуру тільки в одній точці, тепловізор може дистанційно вимірювати температуру на поверхні об'єкта в багатьох точках і за результатами вимірювань формувати теплове зображення об'єкта.

Порівняння основних технічних характеристик зразків тепловізорів оздоблених мікроболометричними матрицями провідних компаній світу наведено в таблиці 1, що складена авторами з використанням [4,5,6,7,8,9].

Таблиця 1.

Технічні характеристики тепловізорів з мікроболометричними матрицями провідних компаній світу [4,5,6,7,8,9].

Характеристики	FLIR T1020 (США, Естонія)	R500EX (Японія)	Fluke TiX580, (США)	Pulsar Forward F455S, (Франція)	Hikmicro SP60-L25 (Китай)	Testo 890-2 (Німеччина)
Тип детектора	Матриця (FPA), мікроболометр без охолодження					
Поле зору (FOV, град.	28 × 21	32 × 24	34 × 24	16,5 × 12,4	24,8 × 18,7	42 × 32
Фокусна відстань, мм	36	10	15	20	25	10
ІЧ-роздільна здатність, пікселей	1024 (Г) × 768 (В)	640 (Г) × 480 (В)	640 (Г) × 480 (В)	384 (Г) × 288(В)	640 (Г) × 480 (В)	640 (Г) × 480 (В)
Діапазон температур об'єкта, °С:	від -20 до +650	від -20 до +650	від -20 до +1000	–	від -20 до +650	від -20 до +1400
Просторова роздільна здатність, мрад	0,47	0,87	0,93	–	–	0,71
Теплова чутливість/NETD, мК	<20	–	50	< 25	< 30	< 40
Мінімальна розрізнявальна різниця температур, °С	0,02°С	0,025°С	≤ 0,05 °С	–	≤ 0,03°С	< 0.04°С
Вага, кг	1.900	1.300	1.540	0,450	1.480	1.630

Оскільки проведення теоретичних розрахунків для визначення теплового режиму радіоелектронних засобів добування інформації, що можуть використовуватися на ОІД, є складним завданням, безконтактні методи вимірювання температури за допомогою тепловізорів набувають особливого значення завдяки низці переваг:

- автоматизація процесу вимірювання, обробка та документування отриманих даних у реальному часі за допомогою електронних обчислювальних систем;
- можливість безперервного контролю стану досліджуваного об'єкта;
- знімання інформації про температурні поля з більшої кількості точок поверхні радіоелектронних засобів за короткий проміжок часу, ніж при використанні контактних температурних датчиків;

- отримання даних про температуру у важкодоступних місцях завдяки багатoelementним приймачам без охолодження, таким як FPA (Focal Plane Array) або мікроболометри;
- використання сучасних технологій, зокрема систем комп'ютерного зору, що значно покращує точність та ефективність досліджень.

Основною об'єктивною проблемою під час пошуку закладних пристроїв за їхніми тепловими характеристиками є складність побудови самих радіoeлектронних засобів добування інформації як об'єктів контролю. Зазвичай такі пристрої виготовляються з матеріалів (кремній, германій, арсенід галію, алюмінієві сплави, нержавіюча сталь тощо), що мають різні коефіцієнти випромінювання та високу щільність компонування. Це може спричинити підсилення ефекту взаємного відбиття теплових хвиль всередині контрольованого об'єкта.

У мікроелектроніці спостерігається тенденція до значного зменшення розмірів пристроїв, що ускладнює тепловий контроль. Наприклад, такі компанії, як Broadcom і Qualcomm, які є лідерами у виробництві комунікаційних чипів, а також Texas Instruments, що спеціалізується на аналогових мікросхемах, виготовляють свою продукцію за технологічними нормами 28 нм і менше [10].

Розглянемо узагальнену функціональну схему тепловізора, що наведена на Рис.1 [11].

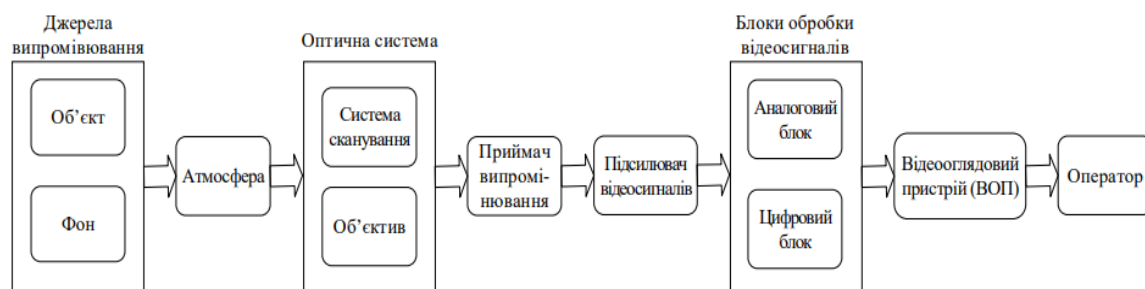


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема тепловізора [11]

Основні технічні характеристики, за якими визначають функціональні можливості тепловізора, включають [12]:

- діапазон вимірюваних температур;
- температурна роздільна здатність;
- поле зору;
- миттєве поле зору (просторова роздільна здатність);
- робочий спектральний діапазон;
- розмір матриці (кількість елементів у приймачі випромінювання);
- чутливість.

Крім основних параметрів, для більш точної оцінки функціональності, надійності та зручності використання тепловізора в певних умовах застосування враховують додаткові характеристики [12]:

- час відгуку (період, необхідний пристрою для реагування на зміни температури);
- точність вимірювання температури;
- можливість калібрування;
- енергоспоживання;
- маса та габарити;
- ступінь захисту від вологи та пилу (відповідність стандартам захисту);
- можливість підключення до інших пристроїв або мереж;
- термін експлуатації тепловізора.

Для моделювання теплового каналу витоку інформації доцільно застосовувати теорію виявлення та розпізнавання сигналів, використовуючи енергетичний критерій.

Щоб визначити мінімальну чутливість тепловізора, розрахуємо потужність випромінювання чорного тіла з одиниці поверхні відповідно до закону Стефана-Больцмана [13]:

$$R = v \cdot T^4, \frac{Bm}{m^2}, \quad (1)$$

$$v = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Bm}{m^2 K^4} \text{ — постійна Стефана-Больцмана.}$$

Відповідно для сірого тіла щільність випромінювання визначається, як:

$$R = \varepsilon \cdot v \cdot T^4 \quad (2)$$

де ε – коефіцієнт випромінювання відповідного матеріалу.

Даний коефіцієнт визначається відношенням енергії, випромінюваної об'єктом при заданій температурі, до енергії, випромінюваної абсолютним випромінювачем (чорним тілом) при тій же температурі. Коефіцієнти випромінювання відповідного матеріалу коливаються в межах від 0,1 до 1,0.

Наприклад, для матеріалів: у металів здатність відбивання буде 70-80 %, а для паперу, води, цегли 10-20 %. Значення коефіцієнта випромінювання (ε , EMS (Emissivity)) для деяких матеріалів наведені в табл. 2 [14].

Таблиця 2.

Значення коефіцієнта випромінювання ε , (Emissivity (EMS)), [14]

Матеріал	Коефіцієнт (ε , emissivity (EMS))	Матеріал	Коефіцієнт (ε , emissivity (EMS))
Азбестова тканина	0,7	Мідь полірована	0,01
Алюміній полірований	0,05	Мідь окислена	0,65
Алюміній окислений	0,25	Резина	0,93
Бетон	0,54	Папір білий	0,9
Бронза полірована	0,1	Папір чорний	0,94
Бронза пориста	0,55	Скло	0,82
Вода	0,88	Сніг	0,8
Залізо поліроване	0,28	Сталь катана	0,56
Залізо прокат	0,77	Сталь іржава	0,69
Золото поліроване	0,02	Фарфор	0,92
Лід	0,97	Цегла	0,85

Щільність випромінювання в смузі пропускання приймача тепловізора $\Delta\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$ можна визначити за виразом:

$$R_{\Delta\lambda} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r\alpha\lambda = \varepsilon \left[\int_0^{\lambda_2} r\alpha\lambda - \int_0^{\lambda_1} r\alpha\lambda \right] = \varepsilon \int_0^8 r\alpha\lambda \left[\frac{\int_0^{\lambda_2} r\alpha\lambda}{\int_0^8 r\alpha\lambda} - \frac{\int_0^{\lambda_1} r\alpha\lambda}{\int_0^8 r\alpha\lambda} \right] = \varepsilon v T^4 [y(\lambda_2 T) - y(\lambda_1 T)], \quad (3)$$

де $y(\lambda_1 T) = \frac{\int_0^{\lambda_1} r\alpha\lambda}{\int_0^8 r\alpha\lambda}$ – таблична функція.

Одночасно необхідно, щоб смуга пропускання приймача тепловізора відповідала або перевищувала смугу частот (довжин хвиль) теплового випромінювання радіоелектронних елементів. Іншими словами, ці параметри мають бути узгоджені. Також слід провести розрахунки очікуваних температур або довжин хвиль теплового випромінювання сучасних радіоелектронних компонентів. Це дозволить визначити відповідні характеристики для різних радіочастотних матеріалів та плат.

Згідно з законом Ламберта, потужність випромінювання в одиниці тілесного кута $\mathbf{I}$ (енергетична сила світла) від плоскої нагрітої поверхні площею $\mathbf{S}$ визначається за формулою [13; 15]:

$$I = \frac{R_{\Delta\lambda} \cdot S \cos \phi}{\pi} = \frac{\varepsilon v T^4 \Delta y_{\Delta\lambda}(T) \cdot S \cos \phi}{\pi}, \quad \frac{Bm}{cp}, \quad (4)$$

де $S \cos \phi$ – площа проекції випромінюючої поверхні в напрямку, що розглядається;

ϕ – кут між нормаллю до випромінюючої поверхні та напрямком, що розглядається.

В інженерній практиці для визначення діаграми спрямованості випромінювання об'єкта використовують геометричне місце кінців вектора енергетичної сили світла $\mathbf{I} = \mathbf{f}(\Theta, \phi)$, яке називається індикатрисою або діаграмою спрямованості випромінювання за потужністю. У цьому контексті діаграма спрямованості представляє собою сукупність плоских поверхонь, у межах яких значення температури $\mathbf{T}$ та випромінювальної здатності ε можна вважати сталими.

Ця геометрична візуалізація дозволяє аналізувати та прогнозувати напрямки та характеристики випромінювання об'єкта. Такий підхід спрощує математичні розрахунки та дає змогу отримати важливі параметри для проектування й оцінки систем і пристроїв, що працюють із випромінюванням або потребують його керування. Вважається, що поверхні, внесок яких у загальне випромінювання об'єкта є незначним, можуть бути виключені з аналізу.

За таких умов розрахунок енергетичної сили світла для i -ї поверхні, а також загальної енергетичної сили світла $\mathbf{I}$ проводять для характерних площин за відповідною формулою (4). Загальна енергетична сила світла визначається як:

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N I_i$$

де N – кількість поверхонь, що вносять значний вклад у сумарне випромінювання об'єкта.

Індикатриса випромінювання будь-якого з об'єктів, які є джерелами інфрачервоного випромінювання, можуть носити ізотропний характер або мати чітко визначений максимум.

На вході системи тепловізора що фокусує потужність випромінювання дорівнює:

$$P_{\text{ex}} = I_{\Sigma}(\theta_{\text{OEC}}, \phi_{\text{OEC}}) \cdot \beta_{\phi} \cdot \xi, \quad (5)$$

де $\beta_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{D^2}$ – тілесний кут, який охоплюється площею системи тепловізора, що фокусує;

D – відстань від випромінюючого об'єкта до приймача тепловізора;

ξ – коефіцієнт перепускання середовища.

Отже, для підвищення потужності випромінювання на вході фокуруючої системи тепловізора пропонується:

збільшення тілесного кута β_{ϕ} , що охоплюється площею фокууючої системи;

скорочення відстані D між випромінюючим об'єктом та приймачем оптико-електронної системи (тепловізора);

підвищення коефіцієнта пропускання середовища ξ , а також збільшення чутливості приймача тепловізора.

Фіксація інфрачервоної помітності об'єктів випромінювання буде можливою в тому випадку, коли P_{ex} потужність випромінювання перевищуватиме порогове значення P_{min} , що визначає чутливість приймача тепловізора.

Таким чином, для розглянутого випадку рівняння можна записати у такій формі:

$$\sum_{i=1}^{N\Sigma} \varepsilon_i \cdot v \cdot T_i^4 \Delta y_i \cdot S_i \cos \phi_i \cdot \frac{S_{\phi}}{\pi \cdot D^2} P_{\text{min}}, \quad (6)$$

Виконання умови (6) можливо досягти збільшенням параметрів $\varepsilon_i, T_i, \Delta y_i, S_i, \frac{S_{\phi}}{D^2}, \cos \phi_i$ та зменшенням параметрів D .

Водночас, $\beta_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{D^2}$ є тілесним кутом, що охоплюється площею фокууючої системи тепловізора.

Якщо позначимо Δf – смугу перепускання електронного тракту, [Гц],

$\tau_{\text{кадра}}$ – визначений час для формування кадру [с],

Δh – елементарне поле зору по горизонталі, [рад],

Δv – елементарне поле зору по вертикалі, [рад].

Тоді, для оптимальної швидкості зчитування інформації потрібно виконати умову [16]:

$$\Delta f \approx \frac{1}{\tau_1}, \quad (7)$$

де τ_1 – постійна часу приймача випромінювання.

Якщо приймач має $m \cdot n$ – число чутливих елементів, то за час формування кадру $\tau_{\text{кадра}}$ може бути переглянутий тілесний кут β_{ϕ} :

$$\beta_{\phi} = \frac{\Delta h \Delta v \tau_{\text{кадра}} m \cdot n}{\tau_1}, \quad (8)$$

Тому для збільшення тілесного кута необхідно за можливістю збільшувати кількість чутливих елементів в матриці, збільшувати $\tau_{\text{кадра}}$ час формування кадру.

Геометрична розрізняюча здатність тепловізора, в матричних тепловізорах при правильній обраній оптичній системі, відповідає кількості окремих елементів в матриці багатоеlementного твердо тільного приймача FPA – Focal Plate Area, що не охолоджується. Так, ще в 2013 році DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) була представлена нова низькочастотна інфрачервона камера з FPA матрицею розміром 1280x720 пікселів [17].

В свою чергу постійну часу приймача випромінювання необхідно зменшувати, тим самим збільшуючи смугу перепускання електронного тракту. Величина цього параметра для елемента

мікроболометричної матриці може складати величину порядку $\tau = 18 \cdot 10^{-3}$ секунди та для фотонних приймачів дорівнювати $\tau = 40 \cdot 10^{-6}$.

Частота зміни зображення тепловізора визначається повним часом, на протязі якого аналізується поле зору. Якщо вихідний сигнал кожного матричного елемента сканують на протязі 1/50 секунди, то відповідна частота зміни зображення буде 50 Гц.

Температурна чутливість $\Delta u_{\Delta\lambda}(T)$ ІЧ-матричних приймачів, дорівнює мінімальній еквівалентній шуму різниці температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) і є критерієм якості тепловізійного приймача.

Вона характеризує його енергетичну чутливість та представляє собою різницю температур, при якій відношення пікового значення сигналу до середньоквадратичної величини шумів на виході приймальної системи, дорівнює одиниці. Або, іншими словами, NETD представляє собою мінімальну питому різницю температур, яка може бути виміряна апаратними засобами.

Якщо взяти до уваги характеристики оптичної системи, то вони визначаються матеріалом з якого виготовляються лінзи та оптичною схемою об'єктива. До основних оптичних та інших фізико-механічних параметрів і характеристик матеріалів відносяться [2,11,12]:

- спектральне пропускання або віддзеркалення;
- показник заломлення;
- дисперсія;
- зміна коефіцієнта пропускання і показника заломлення при зміні температури;
- щільність;
- твердість;
- теплопровідність;
- коефіцієнт термічного розширення;
- теплоємність;
- модуль пружності;
- температури розм'якшення та плавлення;
- стійкість до впливу різних середовищ.

При розробці оптичних систем для будь-якого ІЧ-піддіапазону, в першу чергу необхідно враховувати можливості використання оптичних матеріалів, що володіють достатньою прозорістю в заданій області спектра.

Виходячи з того що лінза повинна бути прозорою для проходження ІЧ-випромінювання, то вихідним матеріалом з якого бажано виготовляти оптичні системи є кремній, германій, сульфід цинку, селенід цинку, фториди лужних металів, специфічні пластмаси. На даний час завдяки помірній ціні, гарним експлуатаційним характеристикам та прозорості від 2 до 16 мкм, германій отримав на ринку виготовлення оптичних систем найбільше поширення. В свою чергу від схеми побудови оптичної системи залежить високоякісна дискретизація зображення та можливість позбавлення різних завадових ефектів.

Ще одним з напрямків вдосконалення параметрів сучасних тепловізорів є застосування та вдосконалення програмного забезпечення та використання систем комп'ютерного зору. Одним з прикладів тому, може слугувати системи технічного зору компанії Raytheon Vision Systems (USA, California) розробляє удосконаленні технології виготовлення дискримінуючих матриць фокальної площини FPA в середньохвильовому ІЧ-діапазоні (MWIR), та довгохвильовому ІЧ-діапазоні (LWIR).

Іншим прикладом, є розробка FPA камер з чипом SMART від BAE Systems (тепловізійна багатошарова модульна архітектура високого розрізнення). Такі камери здатні забезпечувати компактні довгохвильові інфрачервоні рішення (LWIR) за рахунок поєднання 12-мікронного приймача типу FPA з багаточіповим стеком, який інтегрований для конкретного застосунку [17].

В свою чергу протидіюча сторона буде намагатися як можна знижувати температуру поверхонь, що випромінюють шляхом їх охолодження повітрям або хладагентом. Іншим способом зниження потужності ІЧ-випромінювання об'єктів є покриття відповідних поверхонь матеріалом, який володіє малим коефіцієнтом випромінювання. Індикатрису випромінювання можливо впроваджених радіоелектронних засобів з'йому інформації на об'єктах інформаційної діяльності зловмисник може намагатися звузити, якщо буде застосувати екранування конструктивними елементами.

Таким чином, отримано формалізовану модель теплового каналу витоку інформації на ОІД за енергетичним критерієм, яка враховує основні фізичні характеристики приймача, що значною мірою визначають узагальнену чутливість і ефективність роботи тепловізорів. Ці параметри також впливають на продуктивність апаратних або апаратно-програмних комплексів, створених на основі тепловізійних пристроїв.

Мінімальна чутливість приймача тепловізора визначається пороговим рівнем, який залежить від внутрішніх теплових шумів приймального модуля. Вираз (6) дозволяє прогнозувати параметри

створюваного або аналізованого тепловізора на основі характеристик приймача. Водночас, він допомагає правильно вибрати тип приймального пристрою, кількість його елементів і розміри для забезпечення необхідних технічних характеристик.

Наукова новизна запропонованих рішень полягає в їхній комбінації та спрямованості на підвищення ефективності фокусувальної системи тепловізора.

Збільшення тілесного кута, що охоплюється площею фокусувальної системи, підвищує кількість випромінювання, що потрапляє на приймач, що покращує здатність тепловізора реєструвати об'єкти.

Зменшення відстані між випромінюючим об'єктом та приймачем дозволяє отримувати більше інформації про об'єкт, підвищуючи відношення сигнал-шум і, відповідно, покращуючи якість зображення.

Збільшення коефіцієнта пропускання середовища та підвищення чутливості приймача сприяє реєстрації більшої кількості випромінювання, що підвищує точність і якість вимірювань.

Запропоновані вдосконалення технічних характеристик тепловізійних пристроїв підвищують ефективність фокусувальної системи. Комплексний підхід до їх реалізації дозволяє досягти максимальних результатів у виявленні та розпізнаванні радіоелектронних засобів добування інформації, що можуть використовуватися на ОІД.

Слід відмітити, що комплексні рішення на базі Computer Vision вже активно починають використовувати у різних сферах бізнесу та виробництва. Розмір ринку на 2021 рік становить 12,22 мільярди доларів США, а згідно прогнозу, на 2028 буде збільшений до 20,05 мільярдів доларів США. Прикладом таких компаній можуть слугувати такі як: FLIR, Testo, Seek Thermal, Hikvision, які використовують вбудовані комп'ютерні алгоритмами для аналізу теплових зображень в своїй лінійці моделей.

Завдяки цим технологіям тепловізори можуть вдосконалювати розрізняльну здатність та забезпечувати високу ефективність у різних сферах людства, таких як інформаційна безпека, військова справа та наукові дослідження.

Пропозиції з упорядкованої послідовності дій при термографічному контролі можливо представити наступним чином:

1. Шляхом послідовного сканування об'єкта інформаційної діяльності, тепловізор підносять до огорожувальних конструкцій з метою виявлення можливо впроваджених радіоелектронних засобів добування інформації в огорожувальних конструкціях, до складу яких входять працюючі радіоелектронні комплектуючі, та реєструють їх теплове випромінювання, з подальшою візуалізацією у вигляді термограми.

2. Отримані температурні поля порівнюють з еталонним, які зберігається в пам'яті ноутбука (за звичай еталонні температурні сигнали отримують шляхом усереднення термограм передчасно відомих «чистих» огорожувальних конструкцій).

Експериментальні дані, які необхідні для побудови достовірних математичних моделей (еталонів), можуть бути отримані тільки при наявності еталонів в нормі, тобто апріорі відомих еталонів «чистих» огорожувальних конструкцій та апріорі відомих еталонів існуючих радіоелектронних комплектуючих. Тобто заздалегідь утворюють необхідні бази даних температурних полів, з можливістю їх подальшого доповнення.

3. В подальшому для конкретизації щодо приналежності отриманої термограми до тих чи інших радіоелектронних комплектуючих відбувається порівняння термограм з відомими еталонами.

4. Дешифрування термограм виконується навченими операторами або автоматизованою системою.

5. Висновок про наявність (або відсутність) можливо впроваджених радіоелектронних засобів добування інформації в огорожувальних конструкціях, до складу яких входять працюючі радіоелектронні комплектуючі, приймається на основі кореляції еталонів в нормі, тобто апріорі відомих еталонів існуючих радіоелектронних комплектуючих та отриманих зображень, особливостей їх часової поведінки.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті пророблених досліджень в статті проведено порівняльний аналіз основних технічних характеристик сучасних зразків тепловізорів оздоблених мікроболометричними матрицями провідних компаній світу.

Розроблено формалізовану модель теплового каналу витоку інформації на ОІД за енергетичним критерієм, на основі якої запропоновано вдосконалення технічних характеристик тепловізійних пристроїв, зокрема:

- ✓ збільшення тілесного кута, що охоплюється площею фокусувальної системи;
- ✓ скорочення відстані між випромінюючим об'єктом та приймачем тепловізора;
- ✓ підвищення коефіцієнта пропускання середовища;
- ✓ збільшення чутливості приймача тепловізора.

Застосування цих рішень сприяє покращенню ефективності виявлення та нейтралізації радіоелектронних засобів добування інформації, що можуть бути використані зловмисниками на ОІД у сучасних умовах.

Запропоновані вдосконалення спрямовані на підвищення ефективності використання тепловізійних пристроїв у сфері інформаційної безпеки. Впровадження цих технологічних рішень може стати ключовим фактором у запобіганні витоку інформації через теплові технічні канали в умовах сучасних технологічних загроз.

Практична цінність дослідження полягає у підвищенні якості виявлення та нейтралізації радіоелектронних засобів добування інформації під час проведення спеціальних досліджень, що досягається шляхом покращення технічних можливостей тепловізійних пристроїв.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення вбудованих алгоритмів підвищення чіткості зображення для автоматичного виявлення та аналізу температурних полів. Це дозволить ефективно інтегрувати тепловізори в апаратно-програмні комплекси для створення систем мультисенсорної обробки даних. Крім того, перспективним напрямком є розробка мобільних додатків та інтерфейсів, що забезпечать отримання, аналіз і документування теплових полів у реальному часі.

Література

1. Pavlenko Y. Determination of signal level for protection of information in case of its interception by technical means of intelligence. Technology audit and production are serves. 2023. Т. 4. № 1(72). С. 25–28. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286193>
2. Колобродов В., Микитенко В., Балінський Є. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія. Київ : Вікпрінт, 2017. 202 с.
3. Guri M., Monitz M., Mirski Y., Elovici Y. Bit Whisper: Covert Signaling Channel between Air-Gapped Computers Using Thermal Manipulations. IEEE 28th Computer Security Foundations Symposium CSF. 2015. С. 276–289.
4. Сайт компанії Teledyne FLIR URL: <https://www.flir.eu/products/t1020/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions> (дата звернення: 05.11.2024).
5. Сайт компанії NSPPON AVIONICS CO., LTD. URL: <https://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/r500ex/spec.html> (дата звернення: 05.11.2024).
6. Сайт компанії FLUKE URL: <https://www.fluke.com/en/product/thermal-cameras/tix580> (дата звернення: 05.11.2024).
7. Сайт компанії Pulsar Vision URL: <https://pulsarvision.com/products/night-vision-attachments/forward/> (дата звернення: 05.11.2024).
8. Сайт компанії HIKMICRO URL: <https://www.hikmicrotech.com/de/industrial-products/sp60-and-sp60h-series-handheld-thermal-imager/> (дата звернення: 05.11.2024).
9. Сайт компанії Testo URL: <https://www.testo.com/en-US/testo-890-2/p/0563-0890-V2> (дата звернення: 05.11.2024).
10. P. Chen, J. Yin, F. Zhang, P.-I. Mak, R. P. Martins, R. B. Staszewski, “Mismatch Analysis of DTCs Withan Improved BIST-TDC in 28-nm CMOS.”IEEE Transactions on Circuitsand Systems I: Regular Papers. 2022. vol. 69, № 1, с. 196-206. doi: 10.1109/TCSI.2021.3105451.
11. Колобродов В., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): підручник. Київ: Тираж, 1999. 340 с.
12. Gaussorgues G. Latherno graphiein frarouge: principes, technologies, applications. 2nd ed. Paris Lavoisier. 1999. 589 с.
13. Lloyd J. M. Thermal Imaging Systems: New York: Plenum Press, 1975. 456 с.
14. М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. Технічні засоби автоматизації (Частина 2). Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. 455 с.
15. Криксунов Л. З., Падалка Г. А. Тепловізори: Довідник. Київ: Техніка. 1987. 166 с.
16. Венгер Є., Дунаєвський В., Котовський В., Болгарська С., Кислий В., Тимофеев В., Орел В., Назарчук С. Інфрачервона термографія – ефективний інструмент сучасного науково-технічного застосування Scienceand Innovation. 2021. Т. 17. № 5. С. 20–33.
17. Balko B., Chappell I., Franklin J., Kraig R. Military Applications of Curved Focal Plane Arrays Developed by the HARDI Program. Institute for Defense analyses. Document NS D-4268. 2011. 98 с.

References

1. Pavlenko Y. Determination of signal level for protection of information in case of its interception by technical means of intelligence. Technology audit and production are serves. 2023. Т. 4. No. 1(72). P. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286193>
2. Kolobrodov V., Mykytenko V., Balinsky E. Efficiency of infrared optical-electronic surveillance systems: monograph. Kyiv: Vikprint, 2017. 202 p.
3. Guri M., Monitz M., Mirski Y., Elovici Y. Bit Whisper: Covert Signaling Channel between Air-Gapped Computers Using Thermal Manipulations. IEEE 28th Computer Security Foundations Symposium CSF. 2015. P. 276–289.

4. Teledyne FLIR website URL: <https://www.flir.eu/products/t1020/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions> (accessed 05.11.2024).
5. NSPPON AVIONICS CO., LTD. website URL: <https://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/r500ex/spec.html> (accessed 05.11.2024).
6. FLUKE website URL: <https://www.fluke.com/en/product/thermal-cameras/tix580> (accessed 05.11.2024).
7. Pulsar Vision website URL: <https://pulsarvision.com/products/night-vision-attachments/forward/> (accessed 05.11.2024).
8. HIKMICRO website URL: <https://www.hikmicrotech.com/de/industrial-products/sp60-and-sp60h-series-handheld-thermal-imager/> (accessed: 05.11.2024).
9. Testo website URL: <https://www.testo.com/en-US/testo-890-2/p/0563-0890-V2> (accessed: 05.11.2024).
10. P. Chen, J. Yin, F. Zhang, P.-I. Mak, R. P. Martins, R. B. Staszewski, "Mismatch Analysis of DTCs Withan Improved BIST-TDC in 28-nm CMOS."IEEE Transactions on Circuitsand Systems I: Regular Papers. 2022. vol. 69, no. 1, pp. 196-206. doi: 10.1109/TCSI.2021.3105451.
11. Kolobrodov V., Shuster N. Thermal imaging systems (physical foundations, design and control methods, applications): textbook. Kyiv: Tirazh, 1999. 340 p.
12. Gaussorgues G. Latherno graphiein frarouge: principes, technologies, applications. 2nd ed. Paris Lavoisier. 1999. 589 p.
13. Lloyd J. M. Thermal Imaging Systems: New York: Plenum Press, 1975. 456 p.
14. M.V. Lukinyuk, V.P. Lysenko, V.E. Lukin, A.M. Gladkyi, S.A. Shvorov, A.A. Rudensky, A.A. Zaverkin. Technical means of automation (Part 2). Nizhyn: Publisher PP Lysenko M.M., 2018. 455 p.
15. Kryksunov L. Z., Padalka G. A. Thermal imagers: Handbook. Kyiv: Technika. 1987. 166 p.
16. Wenger E., Dunaevsky V., Kotovsky V., Bolgarska S., Kislyi V., Timofeyev V., Orel V., Nazarchuk S. Infrared thermography - an effective tool for modern scientific and technical applications Scienceand Innovation. 2021. T. 17. No. 5. P. 20–33.
17. Balko B., Chappell I., Franklin J., Kraig R. Military Applications of Curved Focal Plane Arrays Developed by the HARDI Program. Institute for Defense analyses. Document NS D-4268. 2011. 98 p.