УДК 621.384.3

DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.1.198594

Аналіз факторів, які впливають на ефективність оптико-електронних систем

Лисенко А.С.
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури keoa.kpi.ua
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

***Анотація*—У даній статті розглянуто основні критерії виявлення об'єктів з використанням оптико-електронних засобів в інфрачервоному діапазоні. Проведено аналіз літературних джерел і наведено основи візуалізації і формування інфрачервоних зображень в тепловізійних системах. Розглянуто доцільність використання критерію Джонсона при розрахунку ефективності оптико-електронних систем в реальних умовах. Зазначені фактори, які в більшій мірі впливають на дальність і якість виявлення цілі. Також проаналізовані актуальні моделі та програмні пакети, які враховують негативні фактори.**

Ключові слова — система спостереження; тепловізійна система; інфрачервоне зображення; виявлення об'єктів.

I. Вступ

На сьогодні оптико-електронні системи (ОЕС) з захопленням зображення в інфрачервоному діапазоні спектра широко застосовуються в різних сферах людської діяльності. Тепловізійні пристрої використовують термовипромінювання, які роблять можливим виділення предметів і людей в повній темряві та в різних складних несприятливих для візуального спостереження погодних умовах. Типовим застосуванням такої технології є системи безпеки і спостереження, а також галузь автономної навігації літальних апаратів і наземних транспортних засобів.

Метою роботи є огляд існуючих критеріїв для точної оцінки істинних характеристик ОЕС з урахуванням несприятливих факторів реальних умов.

II. Основи візуалізації інфрачервоних зображень

Як вже було зазначено, тепловізійні системи дозволяють виявляти об’єкти в повній темряві. Це досягається завдяки можливості нагрітих об’єктів випромінювати або відбивати електромагнітні хвилі, в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Інфрачервоне випромінювання має більшу довжину хвилі, ніж видима частини спектру, тому для людини таке випромінювання є непомітним [1].

Інфрачервоний спектр, в свою чергу, поділяється на кілька діапазонів [2]:

- Near-Infrared (NIR) – світло ближнього ІЧ діапазону спектра, від 0,7 до 1 мкм.
- Short-Wave Infrared (SWIR) – світло короткохвильового ІЧ діапазону спектра, від 1 до 3 мкм.
- Middle-Wave Infrared (MWIR) – світло середнього ІЧ діапазону спектра, від 3 до 5 мкм.
- Long-Wave Infrared (LWIR) – довгохвильова діапазон ІЧ спектра, від 8 до 14 мкм.
- Very Long-Wave infrared (VLWIR) – понаддовгохвильовий діапазон ІЧ спектра, понад 14 мкм.

Тепловізори здатні приймати випромінювання об’єкту в ІЧ діапазонах спектру, які мають вікно прозорості атмосфери, тобто MWIR та LWIR [3], як показано на Рис. 1 [4]. У сучасних системах формування ІЧ зображень використовується довгохвильовий діапазон для збереження умов освітлення.

Перед тим як ІЧ зображення дійде до спостерігача, воно повинно пройти надскладну структуру, яка включає оптичні лінзи, матрицю, що реєструє інфрачервоне світло, блоки обробки зображення та оптимізації і виведення на дисплей.

Структурна схема процесу поетапного формування ІЧ зображень зображена на Рис. 2 [3].

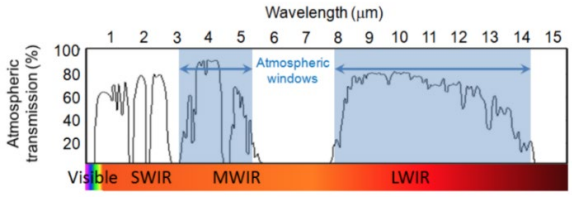

Рис. 1 ІЧ діапазони електромагнітного спектра, які є прозорими в повітрі

Copyright (c) 2020 Лисенко А. С.

DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.1.198594

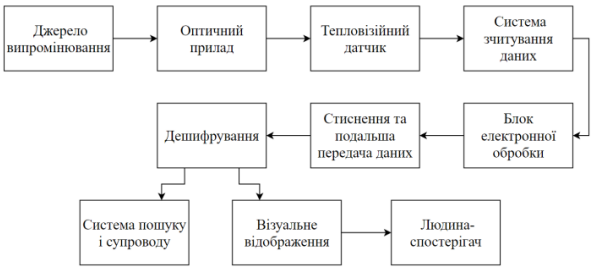

Рис. 2 Ланцюг формування ІЧ зображення в тепловізійних системах

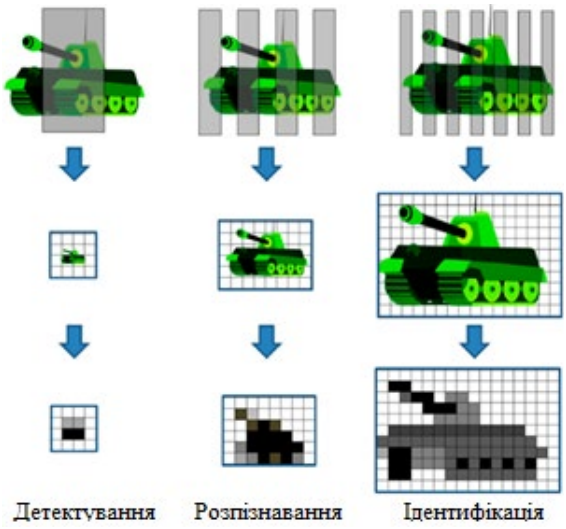

Рис. 3 Ілюстрація застосування методу на реальній цілі і передбачуваному зображенні

ТАБЛИЦЯ 1 РІВНІ ВІЗУАЛЬНОГО СПРИЙНЯТТЯ

Рівні візуального сприйняття	Роздільна здатність	
	Пари ліній на розмір цілі	Пікселі на розмір цілі
Виявлення	1 ± 0,25	2
Орієнтація	1,4 ± 0,35	-
Розпізнавання	4 ± 0,8	7
Ідентифікація	4 ± 0,8	13

III. ОСНОВНИЙ КРИТЕРІЙ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

На сьогоднішній день існує безліч методів виявлення об'єктів на ІЧ зображенні з використанням ОЕС, але першовідкривачем в цьому питанні став Джон Джонсон в 1958 році. Він охарактеризував ймовірність виявлення об'єкта на основі ефективної роздільної здатності зображуваного предмета і виявив, що в міру збільшення роздільної здатності цілі, зростає і ймовірність того, що спостерігач успішно її виявить [5].

В основі методу виявлення лежить певна кількість штрихових пар ліній, які заповнюють спостережуваний об'єкт в залежності від його роздільної здатності (Рис. 3, [3]). Існує чотири основних рівня візуального сприйняття, які визначив Джонсон: 1) виявлення (наявність об'єкта), 2) визначення орієнтації (вертикальна, горизонтальна), 3) розпізнавання (визначення класу об’єкту), 4) ідентифікація (розрізнення об'єктів в класі). Кожен рівень визначається своєю кількістю штрихованих пар ліній. Відповідно, якщо на об'єкт укладається більша кількість подібних пар, то такий об'єкт є більш інформативним. У Таблиця 1 наведено кількість пар ліній і пікселів на розмір цілі, які відповідають кожному рівню сприйняття.

Критерій Джонсона не враховує безліч факторів, які впливають на розпізнавання об'єктів, тобто він застосовується лише в ідеальних умовах, але даний концепт ліг в основу подальших удосконалених моделей і методів.

IV. ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ

Кожна ланка ланцюга формування зображення будь-яким чином впливає [6]–[8] на сприйняття об'єктів в тепловізійних пристроях. Перед тим як випромінювання від об'єкта досягне оптики тепловізійного сенсора, воно повинно пройти через безліч перешкод, які включають в себе атмосферні фактори такі як: опади і стан повітря (вологість, температура), сонячна радіація тощо. При цьому, ймовірність виявлення об’єкта при дальності в 10 км може падати на 30% [9], що показує, наскільки сильно несприятливі погодні умови впливають на розпізнавання і підкреслюють важливість їх врахування.

Крім погодних умов на ймовірність виявлення впливають візуальні перешкоди у вигляді сторонніх об'єктів, які не потребують розпізнання. Це може бути нерівномірний фон зі змінною яскравістю або фон, що складається з геометрично схожих предметів. Джон Маз в своїй роботі [10] вивів кореляцію між зашумленим фоном в ІЧ спектрі і складністю виявлення цілі. При нерівномірному фоні кількість пар ліній на розмір об’єкту в ІЧ діапазоні може збільшуватися з 1,3 до 2,5 і відповідно для його розпізнавання знадобитися більша роздільна здатність.

При проектуванні ОЕС також варто враховувати параметр відношення сигнал/шум (SNR). В літературі [9], [11], [12] цей фактор розглядають разом з розмиттям зображення, так як він аналогічним чином впливає на його розпізнавання. На сьогоднішній день навіть сучасні ОЕС схильні до втрати різкості зображення. Цей параметр визначається за допомогою функцією передачі модуляції.

Фактором впливу при виявленні цілі на ІЧ зображенні важливу роль відіграє сама ціль. Необхідно враховувати її геометричні розміри, зокрема відношення висоти об'єкта до його ширини, а також орієнтацію в просторі. Проведені дослідження, в яких проаналізовано вплив орієнтації танка на його виявлення, вказали, що ймовірність виявлення цілі збоку вище на 30%, ніж спереду [13], а ідентифікація літальних апаратів, в залежності від кута спостереження, може варіюватися до 60% [14].

Окрім геометричних характеристик об’єкту і його орієнтації, значний ступінь в розпізнаванні має спроможність визначення відмінних ознак, особливо при захопленні цілей. Відмінні ознаки в даному випадку варто приймати за унікальні властивості об'єкту і не враховувати загальні ознаки класу. Чим менше ідентифікаційних знаків у цілі, тим складніше її виявити.

Copyright (c) 2020 Лисенко А. С.

DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.1.198594

Наведені вище чинники є основними серед тих, що впливають на оцінку виявлення об'єктів в реальних умовах, тому їх врахування є обов'язковим для створення якісної ОЕС. Щоб врахувати зазначені фактори для оцінювання якості оптичних систем були запропоновані моделі, розглянуті нижче.

V. Моделі для оцінювання якості оптико-електронних систем

Для врахування вищезазначених факторів, критерій Джонсона розширювався і вводили нові показники. Початкове рівняння (1), яке описує ймовірність виявлення цілі і на якому базуються більш точні сучасні моделі, було запропоновано в 1974 році Джоном Джонсоном і Уолтером Лоусом [9]. Ця модель оцінювання має вигляд:

$$P(t) = P_{\infty}\left[1 - e^{(-t/\tau_{FOV})}\right], \quad (1)$$

$$P_{\infty} = \frac{(N/N_{50})^E}{1+(N/N_{50})^E},$$

$$E = 2{,}7 + 0{,}7(N/(N_{50})_D),$$

де $P(t)$ – ймовірність виявлення у визначений момент часу t; $P\infty$ – ймовірність за весь час; E – масштабоване значення, знайдене в результаті експериментів; N – число періодів штрихових пар ліній, які заповнюють спостережуваний об'єкт; N_{50} – число періодів для ймовірності виявлення в 50%; t – момент часу в секундах; τ_{FOV} – середній час пошуку цілі в секундах.

Модель Target Task Performance (TTP) є досконалішою і враховує більшість зовнішніх факторів – характеристики цілі, її орієнтацію в просторі, а також параметр SNR і розмиття зображення з нерівномірним фоном. Такий підхід (2) забезпечує більш точні дані для розрахунку параметрів ОЕС [15]:

$$P = \frac{\left(\frac{N_{resolved}}{V_{50}}\right)^E}{1+\left(\frac{N_{resolved}}{V_{50}}\right)^E} \quad (2)$$

$$N_{resolved} = \frac{\sqrt{A_{TGT}}\,TTP}{Range}$$

$$TTP = \int_{\xi_{low}}^{\xi_{cut}} \left[\frac{C_{TGT}}{CTF_{sys}(\xi)}\right]^{1/2} d\xi$$

$$C_{TGT} = \frac{\sqrt{\Delta\mu_{tgt}^2 + \sigma_{tgt}^2}}{2\mu_{scene}}$$

$$E = 1{,}51 + 0{,}24\frac{N_{resolved}}{V_{50}},$$

де P – ймовірність виявлення цілі; $N_{resolved}$ – число періодів штрихових пар ліній, які заповнюють спостережуваний об'єкт; TTP – значення необхідне для визначення якості зображення і прогнозування дальності виявлення; C_{TGT} – значення контрасту цілі на фоні; E – масштабоване значення критерію TTP; V_{50} – число періодів для ймовірності виявлення в 50%; A_{TGT} – квадратний корінь цільової області у метрах; $Range$ – дальність до цілі в кілометрах; ξ_{cut} – найвища роздільна здатність, яка може бути досягнута при заданому контрасті; ξ_{low} – найнижча роздільна здатність, яка може бути досягнута при заданому контрасті (зазвичай 0); $CTF_{sys}(\xi)$ – контрастна порогова функція системи; μ_{tgt} – середня задана температура цілі в ºK; σ_{tgt} – стандартне відхилення заданої температури в ºK; μ_{scene} – температура фону в ºK.

Для розрахунку впливу погодних умов використовують програмні пакети щоб змоделювати атмосферні чинники за допомогою комп'ютерної симуляції. Бази даних моделей LOWTRAN і MODTRAN продовжують наповнюватись свіжою інформацією протягом кількох десятків років і зараз вони доступні у вигляді модулів і пакетів для Python та MATLAB® [16]–[19].

Висновки

В роботі проаналізовано чинники, які можуть впливати на відстань роботи та здатність виявляти об'єкти в тепловізійних ОЕС. Встановлено, що найбільший негативний внесок мають фактори погоди і атмосферні чинники, нерівномірний фон в сцені, розмиття або розфокусування зображення, а також характеристики самої цілі – її розміри і орієнтація в просторі. Розглянуто моделі та програмні пакети, які дозволяють визначити реальні характеристики розроблювального пристрою і виявити слабку ланку приладу.

Перелік посилань

[1] C. Solomon and T. Breckon, Fundamentals of Digital Image Processing. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010, **ISBN**: 9780470689776.

[2] T. Bourlai and B. Cukic, "Multi-spectral face recognition: Identification of people in difficult environments," in 2012 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics, 2012, pp. 196–201, **DOI:** 10.1109/ISI.2012.6284307.

[3] D. Perić, B. Livada, M. Perić, and S. Vujić, "Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality," Sensors, vol. 19, no. 15, p. 3313, Jul. 2019, **DOI**: 10.3390/s19153313.

[4] "Infrared – The Light We Cannot See," IRG Educational Series, 2016. [Online]. Available: http://www.irradiance-glass.com/2016/08/09/irg-educational-series-infrared-the-light-we-cannot-see/. [Accessed: 09-Aug-1BC].

[5] J. Johnson, "Analysis of image forming systems," in Proceedings of the Image Intensifier Symposium, 1958, **URL**: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf.

[6] M. van Iersel et al., "The influence of meteorological parameters on dynamic infrared signatures," 2016, p. 99790T, **DOI**: 10.1117/12.2239474.

[7] N. S. Kopeika, A. N. Seidman, I. Dinstein, C. Tarnasha, R. Amir, and Y. Biton, "How Weather Affects Seeing Through The Atmosphere," Opt. Eng., vol. 25, no. 3, p. 253505, Mar. 1986, **DOI**: 10.1117/12.7973850.

Copyright (c) 2020 Лисенко А. С.

DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.1.198594

[8] B. Wang, L. Dong, M. Zhao, H. Wu, Y. Ji, and W. Xu, "An infrared maritime target detection algorithm applicable to heavy sea fog," Infrared Phys. Technol., vol. 71, pp. 56–62, Jul. 2015, **DOI**: 10.1016/j.infrared.2015.01.031.

[9] T. A. Sjaardema, C. S. Smith, and G. C. Birch, "History and Evolution of the Johnson Criteria.," Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), Jul. 2015, **URL**: http://www.osti.gov/servlets/purl/1222446/.

[10] J. P. Mazz, "Analysis of observer variability in the assessment of FLIR performance," in Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VII, 1996, pp. 2–11, **DOI**: 10.1117/12.241975.

[11] K. Krapels, R. G. Driggers, D. Deaver, S. K. Moyer, and J. Palmer, "Midwave infrared and visible sensor performance modeling: small craft identification discrimination criteria for maritime security," Appl. Opt., vol. 46, no. 30, p. 7345, Oct. 2007, **DOI**: 10.1364/AO.46.007345.

[12] K. Krapels et al., "Small craft ID criteria (N50/V50) for short wave infrared sensors in maritime security," Infrared Imaging Syst. Des. Anal. Model. Test. XIX, vol. 6941, p. 694108, 2008, **DOI**: 10.1117/12.778062.

[13] S. R. Rotman, "Modeling human search and target acquisition performance: 3. target detection in the presence of obscurants," Opt. Eng., vol. 30, no. 6, p. 824, Jun. 1991, **DOI**: 10.1117/12.55852.

[14] J. C. Leachtenauer and R. G. Driggers, Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems-Modeling and Performance Prediction. Boston, London: Artech House, 2001, **ISBN**: 1-58053-132-6.

[15] R. H. Vollmerhausen and E. Jacobs, "The Targeting Task Performance (TTP) Metric A New Model for Predicting Target Acquisition Performance," Apr. 2004, **URL**: http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA422493.

[16] "MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere." [Online]. Available: http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/modtran.doc.html.

[17] D. Griffith, "Matlab Class Wrapper for MODTRAN 4." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26927-matlab-class-wrapper-for-modtran-4.

[18] M. Noah, "LOWTRAN7 Sun and Moon Models." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71203-lowtran7-sun-and-moon-models.

[19] M. Hirsch, "LOWTRAN: Python module for atmospheric absorption modeling," 2016, **DOI**: 10.5281/zenodo.213475.

UDC 621.384.3

Analysis of Factors Affecting the Efficiency of Electro-Optical Systems

A. S. Lysenko
Department of Design of Electronic Digital Equipment keoa.kpi.ua
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» kpi.ua
Kyiv, Ukraine

***Abstract*—According to present knowledge thermal imaging electro-optical surveillance systems with object detection are widely used in various fields of human activity. Thermal imagers use infrared radiation emitted by objects and people, so it makes possible to take a sight in complete darkness and miscellaneous weather conditions. Typical applications of this technology are security and surveillance systems, along with autonomous navigation industries in aircraft and ground vehicle. The aim of the work is to determine the necessary condition for an accurate parameter estimation of the electro-optical systems allowing for adverse externalities.**

First of all, the various infrared spectrum ranges will be considered and corresponding wavelengths will be pointed for each of the following. Thermal imaging cameras are capable of receiving emission from an object in the infrared spectral ranges, which have an atmospheric transparency window, i.e. MWIR and LWIR.

Then the structural diagram of the phased generation process of infrared images in thermal imaging systems will be discussed. It appears that, the image formation chain includes such components as irradiation source, optics, imaging sensor, read-out electronics, processing electronics, compression and transmission of data, decoding, search & track engine, display and finally human observer.

The next chapter will describe the probability method of detecting objects based on the effective resolution of the depicted object. There will be resulted the table of visual perception levels, namely orientation, recognition, identification. And relative levels of perception will be provided the corresponding resolution of the image.

The next section will analyze the factors affecting the objects identification. Before the radiation from the object reaches the thermal imaging sensor optics, it must go through many obstacles, which include atmospheric factors such as precipitation and air condition (humidity, temperature), solar radiation, etc. Various equations and models will be carried out to take into account the above factors. For example, Johnson's criterion, and a more advanced Target Task Performance recognition model.

This paper considers the main criteria for detecting objects using electro-optical systems in the infrared range. The robust analysis of literature sources will be conduct and describe the basics of visualization and the infrared imaging in thermal systems. Then Johnson criteria, which is considering for calculating the efficiency of electro-optical systems, will be evaluated for validity using in real-world environment. Also, it will be pointed out, that the greatest negative contribution on visualization is made by weather and atmospheric conditions, clutter effects and density, motion-blur and defocusing, along with target properties – aspect ratio and viewing angle. Finally, it will be suggested prediction models and software packages that will help determine the real characteristics of the elaborate device and identify the weak link of the system.

Keywords — surveillance systems; thermal imaging; infrared image; object detection.

Copyright (c) 2020 Лисенко А. С.