

## **Розроблення нових критеріїв якості зображення тепловізійних систем спостереження різного призначення і апаратури для їх визначення**

## **Разработка новых критериев качества изображения тепловизионных систем наблюдения различного назначения и аппаратуры для их определения**

## **Development of thermal surveillance systems image quality criteria for different purposes and equipment for their determination**

- 1. Номер державної реєстрації 0117U002300**
- 2. Науковий керівник – д.т.н., доц. Боровицький В.М., Боровицький В.Н., Volodymyr Borovytsky**
- 3. Суть розробки, основні результати.**

**(Укр.)** Розроблено комплексну методологію оцінки ефективності функціонування інформаційного середовища, до складу якого входить тепловізійна система спостереження (ТПСС), що встановлюється на рухомих носіях, таких як безпілотні літальні апарати, мікро- та нано-спутники. Розглядаються базові сценарії виконання типових задач спостереження, а саме – пошук, виявлення, розпізнавання та ідентифікацію об'єктів на фоні внутрішніх системних шумів, або шумів, енергетична яскравість яких описується гаусовим розподілом.

Запропоновано нові підходи до визначення перспективних оцінок ефективності ТПСС: мінімальної різниці температур, що сприймається, показника успішності виконання завдання ТТР, показника розрізнення орієнтації трикутника. Показано, що характер взаємодії матричної структури аналізатора зображення сучасних приймачів випромінювання з періодичними та неперіодичними об'єктами є різним для стаціонарних і рухомих ТС. Розроблені методи підвищення просторового розділення як при рівномірному русі, так і при низькочастотних вібраціях. Встановлено, що показник ТТР наразі забезпечує найбільш адекватну оцінку сучасних ТПСС, є сумісним із стандартами НАТО і дає можливість аналізувати також багатоканальні системи спостереження. Розроблено механізм врахування багатоканальності інформаційної системи при розрахунках її ефективності з використанням показника ТТР.

Розроблено нові методики вимірювання основних характеристик ТПСС. Запропоновано технічні рішення визначення модуляційної передавальної функції, функції передачі сигналу, зонної характеристики, мінімальної роздільної різниці температур. В основу вимірювання енергетичних характеристик покладено оригінальну схему формування поля яскравості, яка забезпечує великий динамічний діапазон вхідного сигналу з нерівномірністю по полю не більше 5%.

**(Рос.)** Разработана комплексная методология оценки эффективности функционирования информационной среды, в состав которого входит тепловизионная система наблюдения (ТПСС), которая устанавливается на подвижных носителях, таких как беспилотные летательные аппараты, микро- и нано-спутники. Рассматриваются базовые сценарии выполнения типичных задач наблюдения, а именно - поиск, выявления, распознавания и идентификации объектов на фоне внутренних системных шумов, или шумов, энергетическая яркость которых описывается гауссовым распределением.

Предложены новые подходы к определению перспективных оценок эффективности ТПСС: минимальной разницы температур, воспринимается показателя успешности выполнения задания ТТР, показателя различия ориентации треугольника. Показано, что характер взаимодействия матричной структуры анализатора изображения современных приемников излучения с периодическими и непериодическими объектами различен для стационарных и подвижных ТС. Разработанные методы повышения пространственного разделения как при равномерном движении, так и при низкочастотных вибрациях. Установлено, что показатель ТТР пока обеспечивает наиболее адекватную оценку

современных ТПСС, совместим со стандартами НАТО и дает возможность анализировать также многоканальные системы наблюдения. Разработан механизм учета многоканальности информационной системы при расчетах ее эффективности с использованием показателя ТТР.

Разработаны новые методики измерения основных характеристик ТПСС. Предложено технические решения определения модуляционной передаточной функции, функции передачи сигнала, зонной характеристики, минимальной разрешающей разницы температур. В основу измерения энергетических характеристик положена оригинальная схема формирования поля яркости, которая обеспечивает большой динамический диапазон входного сигнала с неравномерностью по полю не более 5%.

**(Eng)** A comprehensive methodology for evaluating the efficiency of the functioning of the information environment, which includes a thermal imaging surveillance system (TPSS), installed on mobile carriers, such as drones, micro- and nano-satellites, has been developed. Basic scenarios for performing typical surveillance tasks are discussed, namely, finding, detecting, recognizing and identifying objects against the background of internal system noise, or noise whose energy brightness is described by Gaussian distribution.

New approaches to determining prospective estimates of the efficiency of TPSS are proposed: the minimal difference in perceived temperatures, the success rate of the TTP task, and the indicator of the difference in the orientation of the triangle. It is shown that the nature of the interaction of the matrix structure of the image analyzer of modern radiation receivers with periodic and non-periodic objects is different for stationary and mobile vehicles. Methods of increasing the spatial separation have been developed both with uniform motion and with low-frequency vibrations. It has been established that the TTR is currently providing the most adequate assessment of current TPSS, is compatible with NATO standards, and also enables the analysis of multi-channel surveillance systems. A mechanism for taking into account the multichannel information system in calculating its efficiency using the TTR index is developed.

New methods for measuring the main characteristics of TPSS have been developed. Technical solutions for determining the modulation transfer function, signal transfer function, band characteristic, minimum separation temperature difference are offered. The basis of measurement of energy characteristics is based on the original scheme of formation of the brightness field, which provides a large dynamic range of the input signal with a nonuniformity in the field of not more than 5%.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

1. Патент №118780 України, Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Колобродов М.С. Оптико-електронний процесор. МПК (2006) G06E 1/00, Власник: НТУУ «КПІ» – у 2017 02269; заяв. 13.03.2017; опуб. 28.08.2017. Бюл. № 16.
2. Патент №116386 України, Колобродов В.Г., Банделюк О.В., Гусев А.Ю. Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив. МПК (2006) G02B 9/12, 13/14, 13/16, Власник: НТУУ «КПІ» – у 2016 06546; заяв. 15.06.2016; опуб. 25.05.2017. Бюл. № 10.
3. Патент №116296 України на корисну модель. МПК (2016.01) G02B 9/34. Ширококутний об'єктив із зменшеною дисторсією. / Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М., Стріха О. Є. (Україна) – Заявл. 19.12.2016; Опубл. 10.05.2017; Бюл. №9.
4. Патент №132032 України на корисну модель. МПК G02B 13/14 (2006.01); G02B 9/34 (2006.01); Чотирилінзовий об'єктив для інфрачервоної області спектра. / Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М., Бондарчук Д. П. (Україна) – Заявл. 13.08.2018; Опубл. 11.02.2019; Бюл. №3.
5. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Пашков Р.А. Комп'ютерна програма “absol\_pic”; Назва охоронного документу - Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір; №88018 дата 23.04.2019.
6. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Пашков Р.А. Комп'ютерна програма “garmonic\_oes”; Назва охоронного документу - Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір; №88019 дата 23.04.2019.

7. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Пашков Р.А. Комп'ютерна програма "оер"; Назва охоронного документу - Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір; №88020 дата 23.04.2019.
8. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Пашков Р.А. Комп'ютерна програма "impulse\_oes"; Назва охоронного документу - Свідоцтво № 88023 України про реєстрацію авторського права на твір; №88023 дата 23.04.2019.
9. Кравченко І.В., Микитенко В.І., Пашков Р.А. Комп'ютерна програма "fish\_scr"; Назва охоронного документу - Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір; №88017 дата 23.04.2019.

## **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Науково-технічний рівень виконаної роботи відповідає світовому в частині методів аналізу і синтезу ТПСС. Запропонований механізм врахування багатоканальності в розрахунках показника якості ТТР є новим і розширює функціональність сучасних світових аналогів (Vollmerhaussen R. Night vision integrated performance model: impact of a recent change on the model's predictive accuracy // Optics Express, Vol. 24, No. 21, 2016. P. 23654-23666. <https://doi.org/10.1364/OE.24.023654>). Розроблені методичні та схемотехнічні рішення щодо лабораторних вимірювань характеристик ТПСС перевищують кращі вітчизняні зразки по динамічному діапазону відтворюваних яскравостей та рівномірності поля або не мають вітчизняних аналогів.

Високий науковий рівень отриманих результатів підтверджується публікаціями в виданнях, які індексуються в наукометричних базах даних Scopus, Web of Science.

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

Отримані в рамках роботи теоретичні результати пропонують вирішення ряду наукових питань світового приладобудування, а практичні напрацювання є актуальними для вітчизняної приладобудівної галузі. Наразі в Україні відсутні вимірювальні лабораторії для атестації тепловізійної техніки. Використання результатів роботи дозволить створити такі лабораторії в короткі терміни з використанням недорогої й доступної елементної бази. Запропоновані технічні рішення сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної оптико-електронної апаратури дистанційного спостереження та обороноздатності держави.

## **7. Потенційні користувачі.**

Результати роботи призначені для використання в розробці, модернізації, атестації тепловізійної техніки дистанційного спостереження. Користувачами розроблених математичних моделей і розрахункових методів можуть бути насамперед вітчизняні підприємства, які створюють та модернізують оптико-електронні системи спостереження інфрачервоного діапазону спектру, зокрема КП СПБ «Арсенал», ДП НДІ «Квант», ДП НВК «Фотоприлад» (м.Черкаси), інші підприємства оптико-електронного приладобудування. Можливе використання профільними розробниками з Китайської Народної Республіки.

## **8. Стан готовності розробки.**

Створені математичні моделі, розрахункові методи, схемні технічні рішення вимірювальних стендів мають вигляд завершених методик, алгоритмів, схем й технічних вимог. Вони є готовими до безпосереднього використання у проектно-розрахункових роботах.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

ДП НДІ «Квант» передано для апробації методики та схеми вимірювання енергетичних та просторових характеристик тепловізорів з використанням елементної

бази, яка є доступною та пристосованою до вітчизняних умов промислового використання.

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail. КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет приладобудівний, кафедра оптичних та оптико-електронних приладів, 044-204-84-46, [v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua](mailto:v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua)

### 11. Фото розробки.



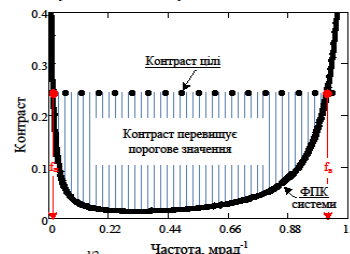
Рис. 1. Розроблений лабораторний макет вимірювання ФПС та зонної характеристики

### Метод оцінки ефективності ОЕСС на основі показника успішності виконання завдання

Традиційне оцінювання ефективності комплексування зображень

- Референтні методи оцінювання
- Абсолютні методи оцінювання

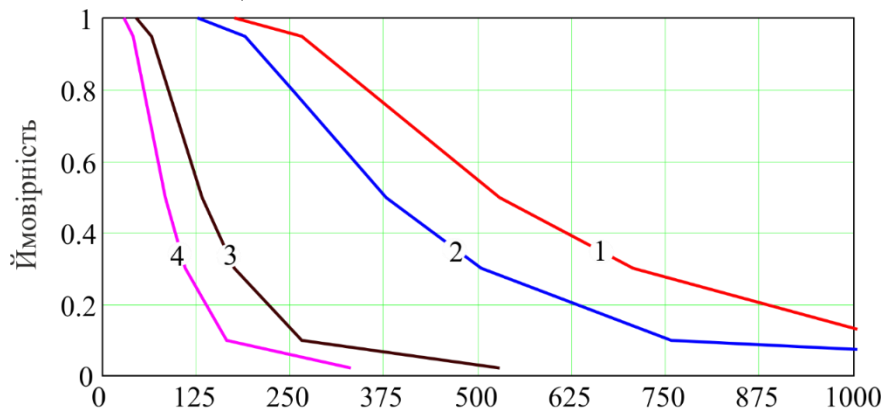
Показник успішності виконання завдання (DRI – detect, recognize, identify model)



$$TTP = \sqrt{TTPH \cdot TTPV}$$

$$TTPH = \int_{f_x}^{f_x'} \left( \frac{C_x}{\Phi_{ПКВ_{ОЕСС}}(f_x)} \right)^{1/2} df_x \quad TTPV = \int_{f_y}^{f_y'} \left( \frac{C_y}{\Phi_{ПКВ_{ОЕСС}}(f_y)} \right)^{1/2} df_y$$

Рис. 2. Оцінювання тепловізійних систем показником ТТР



L, м - відстань до об'єкту

- |                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1 – виявлення об'єкту             | 3 – розпізнавання об'єкту |
| 2 – визначення орієнтації об'єкту | 4 – ідентифікація об'єкту |

Рис. 3. Приклад розрахунку ймовірності виконання задач спостереження людини камерою InfraTec VarioCAM® HD head 600

12. **Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:**

**Монографії**

1. Borovytsky V. Generalization of the theory of image formation in an optical microscope. Київ: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2017. – 118 с.
2. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Диффузные излучатели на основе интегрирующей сферы: теория, метрология, проектирование. Київ: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2017. – 146 с.
3. Колобродов В.Г., Добровольська К.В., Микитенко В.І., Тягур В.М. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікро-боллометричних камер (*монографія*). – Київ: «Вік принт», 2018. – 223 с.
4. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Микитенко В.І., Колобродов М.С. Проектування цифрових когерентних оптичних спектроаналізаторів: монографія. – К: Вид-во «Політехніка», 2019. – 224 с.

**Підручники**

1. Колобродов В.Г. Хвильова оптика. Частина 1. Електромагнітна теорія світла та інтерференція. – К.: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2017. – 208 с.
2. Колобродов В. Г. Хвильова оптика. Дифракція і поляризація світла: підручник. Ч. 2. – Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018. – 230 с.

**Статті в виданнях, що входять до н/м бази Scopus**

1. Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kolobrodov M.S. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer // *Optica Applicata*, 2017 (Vol.47), No.2, pp. 273-282.
2. Vandeluk O.V., Kolobrodov V.G. Розробка наноструктурованих плазмонних підкладок для використання в якості датчиків ГКР // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, 2017, Iss. 70, pp. 62–71.
3. V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur. Development of software for combining finite element and optical analyses // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 4. – No.9 (88). – P. 46-53.
4. Kolobrodov V. H., Tymchik G. S., Mykytenko V.I., Kolobrodov M.S., Lutsiuk M.M. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, 2018, Iss. 72, pp. 78–85.
5. Volodymyr Borovytsky Huygens–Fresnel principle and Abbe formula // *Optical Engineering* 57(9), 2018, 095104.
6. Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Mykytenko V.I., Kolobrodov M.S., Lutsiuk M.M. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, 2018, Iss. 72, pp. 78.
7. V. Borovytsky, O. Hudz, and V. Antonenko The improved optical setup for Abbe-Porter experiment, *Proc. SPIE 10375, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XVIII*, 1037513, 2017.
8. Kolobrodov V.G., Dobrovolska V.I. Mykytenko, G.S. Tymchik, V.M. Tiagur Spaceborne Linear Array Imager's Spatial Resolution For Arbitrary Viewing Angles // *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments* 2017, 104450J-104450J-9.

9. Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kolobrodov M.S. Limit characteristics of digital optoelectronic processor // Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference of Correlation Optics, 106120L, 2018.
10. Kolobrodov V.H., Tymchik G.S., Kolobrodov M.S., Vasyura A.S., Paweł Komada, Zhanar Azeshova. The output signal of a digital optoelectronic processor // Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108080W.
11. Volodymyr Borovytsky and Oleksii Hudz Abbe experiment with inclined grating // Proc. SPIE 10745, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIX, 1074512, 2018. doi: 10.1117/12.2320489.
12. V. Borovytsky Huygens-Fresnel principle and the spatial bandwidth of an optical system // Proc. SPIE. Vol. 10612, 2018, p.106120F.1-8.
13. Kolobrodov V.G. Tymchik G.S., Kolobrodov M. S. The output signal of a digital optoelectronic processor // Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108080W.
14. Kolobrodov V.G. Tymchik G.S., Kolobrodov M.S., Pinchuk B.Y. Influence of the aberrations of Fourier-lens on the resolution of the digital optical processor // Proc. SPIE 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018, 110450U. 15. Valentin H. Kolobrodov; Grygorij S. Tymchik; Mykyta S. Kolobrodov; Bogdan Y. Pinchuk; Zbigniew Omiotek; Daniyar Jarykbassov; Nurbapa Mekebayev Influence of the aberrations of Fourier-lens on the resolution of the digital optical processor // SPIE Proceedings Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 110450U (2019).
16. Kolobrodov V., Mykytenko V., Sokurenko V. Substantiation of a university nanosatellite television camera parameters // Proc. SPIE 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018, 1104512, 2019.
17. Kolobrodov V., Mykytenko V., Lysenko O., Sokurenko V. University Nanosatellite Television Camera / IEEE Conference Proceedings. 2019 IEEE // 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv. – 2019. – P. 543-547.
18. Kolobrodov V. G., Kolobrodov M. S., Vasyura A.S. The output signal of a digital optoelectronic processor // Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108080W.
19. Volodymyr N. Borovytsky, Stanislav Ye. Tuzhanskyi, Andrzej Kotyra, and Gulzada Yerkeldessova Criterion of spatial resolution of imaging system // Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 111761D.
20. Volodymyr Borovytsky Spatial resolution of an optical microscope with oblique illumination // Proc. SPIE 11104, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XX, 111040Q, 2019.
21. Igor G. Chyzh, Valentin G. Kolobrodov, Volodymyr I. Mykytenko, Grygorij S. Tymchik, Paweł Komada, and Ainur Kozbakova Forming thermal imaging system field of view with afocal lens cap // Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 111760T, 2019.
22. Valentin H. Kolobrodov; Grygorij S. Tymchik; Mykyta S. Kolobrodov; Andrzej Kociubinski; Nataliya Denissova; Algazy Kunbolat Expansion of the operating spectral range of the optical processor // Proceedings Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019; 1117607 (2019).

### **Кандидатські дисертації**

1. Кандидатська дисертація «Підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери для супутника», Добровольська К.В., 01.03.2018 р., науковий керівник Колобродов В.Г.;
2. Кандидатська дисертація «Зменшення деформації та ваги вхідної оптики зображуючого фур'є-спектрометра космічного базування», Поздняков Д.В., 30.10.2018 р., науковий керівник Колобродов В.Г.;

3. Кандидатська дисертація «Удосконалення методів проектування дифракційних лінз», Васильковська І.О., 25.06.2019 р., науковий керівник Колобродов В.Г.

13. **Ключові слова.** Ефективність тепловізора, просторова роздільна здатність, енергетичне розділення, критерії якості зображень, вимірювальний стенд