

## **Оптико-цифровой процессор для обработки изображений в тепловизионных системах наблюдения**

## **Оптико-цифровой процессор для обработки изображений в тепловизионных системах наблюдения**

### **Optical-digital processor for thermal imaging surveillance systems image processing**

1. **Номер державної реєстрації** - 0118U002070.
2. **Науковий керівник** – д.т.н., проф. Колобродов В.Г., Колобродов В.Г., Valentin Kolobrodov
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)** У даній роботі досліджуються шляхи підвищення ефективності когерентних оптичних спектроаналізаторів (КОС). Підвищення ефективності досягається за рахунок використання в КОС вхідного транспаранта у вигляді просторово-часового дискретного модулятора світла і реєстратора просторового спектра за допомогою матричного приймача випромінювання (МПВ). Узгодження параметрів модулятора, фур'є-об'єктива і МПВ дозволила покращити технічні характеристики КОС. Під узгодженням розуміється вибір параметрів компонентів КОС, які дозволяють отримати покращені характеристики КОС. Критерій ефективності базується на частоті зміни вхідних сигналів; робочому діапазоні просторових частот; просторовій смузі пропускання; просторовому спектральному розділенні. В розробленій моделі КОС були запропоновані математичні моделі дискретного просторово-часового модулятора світла, фур'є-об'єктива, матричного приймача випромінювання, а також розроблено методи проектування когерентних оптичних спектроаналізаторів.

Для підтвердження результатів проведених теоретичних досліджень було створено лабораторний стенд КОС, який дозволяє виконати вимірювання розподілу інтенсивності світла у дифракційній картині, що сформована тест-об'єктом; визначення відповідності положення дифракційних максимумів і мінімумів в площині спектрального аналізу їх просторовій частоті; вимірювання спектрів тест-об'єктів, отриманих з використання двох лазерів з різними довжинами хвиль; вимірювання технічних характеристик КОС. Розроблено нові методи проведення таких досліджень. Для вимірювання характеристик КОС запропоновано в якості тест-об'єктів використовувати щілину і дифракційну ґратку, а також фур'є-об'єктив із змінною апертурною діафрагмою. Результати експериментальних досліджень підтверджують достовірність теоретичних досліджень з відносною похибкою (5 - 10)%. На запропонований оптико-електронний цифровий процесор обробки зображень та інфрачервоний об'єктив було отримано патенти України на корисну модель №132123, №132032.

**(рос.)** В данной работе исследуются пути повышения эффективности когерентных оптических спектроанализаторов (КОС). Повышение эффективности достигается за счет использования в КОС входного транспаранта в виде пространственно-временного дискретного модулятора света и регистрации пространственного спектра с помощью матричного приемника излучения (МПИ). Согласование параметров модулятора, фурье-объектива и МПИ позволила улучшить технические характеристики КОС. Под согласованием понимается выбор параметров компонентов КОС, которые позволяют получить улучшенные характеристики КОС. Критерий эффективности базируется на частоте изменения входных сигналов; рабочем диапазоне пространственных частот; пространственной полосе пропускания пространственном спектральном разрешении. В разработанной модели КОС были предложены математические модели дискретного пространственно-временного модулятора света, фурье-объектива, матричного приемника излучения, а также разработаны методы проектирования когерентных оптических спектроанализаторов.

Для подтверждения результатов проведенных теоретических исследований был создан лабораторный стенд КОС, который позволяет выполнить измерения распределения интенсивности света в дифракционной картине, сформированной тест-объектом; определение соответствия положения дифракционных максимумов и минимумов в плоскости спектрального анализа их пространственной частоте; измерения спектров тест-объектов, полученных при использовании двух лазеров с разными длинами волн; измерения технических характеристик КОС. Разработаны новые методы проведения таких исследований. Для измерения характеристик КОС предложено в качестве тест-объектов использовать щель и дифракционную решетку, а также фурье-объектив с переменной апертурной диафрагмой. Результаты экспериментальных исследований подтверждают достоверность теоретических исследований с относительной погрешностью (5 – 10)%. На предложенный оптико-электронный цифровой процессор обработки изображений и инфракрасны объектив были получены патенты Украины на полезную модель №132123, №132032.

**(eng)** This paper investigates ways to increase the efficiency of coherent optical spectrum analyzers (COSA). The increase in efficiency is achieved through usage of space-time discrete light modulator in the COSA input and through recording of the spatial spectrum with a matrix detector (MD). The matching of the parameters of the modulator, Fourier lens and MD allowed to improve the technical characteristics of COSA. The matching means the choice of parameters of COSA's components, which allow to obtain improved characteristics of the COSA. The efficiency criterion is based on the input signals change frequency; operating range of spatial frequencies; spatial bandwidth; spatial spectral resolution. Mathematical models of discrete space-time light modulator, Fourier lens, matrix detector, as well as developed methods for designing coherent optical spectrum analyzers were proposed in developed COSA model.

To confirm the results of theoretical research, a laboratory stand COSA was created, which allows you to measure the distribution of light intensity in the diffraction pattern formed by the test object; determining the correspondence of the position of diffraction maxima and minima in the plane of spectral analysis to their spatial frequency; measuring the spectra of test objects obtained using two lasers with different wavelengths; measurement of COSA technical characteristics. New methods of conducting such research have been developed. To measure the COSA characteristics, it is proposed to use a slit and a diffraction grating, as well as a Fourier lens with a variable aperture as test objects. The results of experimental studies confirm the reliability of theoretical studies with a relative error (5 - 10%). Ukraine's patents №132123, №132032 were obtained for the proposed optoelectronic digital image processor and infrared lens.

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

1. Патент на корисну модель №132123, МПК (2018.01) G06E 1/00. Цифровий когерентний оптичний спектроаналізатор / Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Микитенко В.І., Колобродов М.С. Заявлено 14.09.2018; Опубл. 11.02.2019, Бюл. №3, 2019 р.

2. Патент №132032 України на корисну модель. МПК G02B 13/14 (2006.01); G02B 9/34 (2006.01); Чотирилінзовий об'єктив для інфрачервоної області спектра. / Сокуренько В. М., Сокуренько О. М., Бондарчук Д. П. (Україна) – Заявл. 13.08.2018; Опубл. 11.02.2019; Бюл. №3.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.**

В цілому науково-технічний рівень виконаної роботи відповідає світовому, а в практичній частині створення принципово нових КОС на основі матричних модуляторів світла і приймачів випромінювання, які дозволяють обробляти двовимірні оптичні сигнали (зображення) в реальному масштабі часу (Kuz'min M.S., Rogov M.S. Optical Fourier processor with a liquid-crystal information-input device //Journal of Optical Technology. – 2015. – Vol. 83(3). – P. 147–152) перевищує світовий. Вперше визначені технічні характеристики КОС (частота зміни входних сигналів; робочий діапазон просторових частот; просторова смуга пропускання; просторове спектральне розділення) і розроблені методи їх розрахунку і оптимізації.

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.**

Виконана робота відноситься до високотехнологічного напрямку оптико-електронного приладобудування, потенціал якого ще не є розкритим. Принциповими перевагами когерентно-оптичної обробки інформації є можливість обробки величезних обсягів даних із швидкістю світла. Сучасний стан технологій не здатен забезпечити технічну реалізацію розроблених рішень в повному обсязі. Тому важливими є прикладні розробки, які націлені на використання доступної елементної бази і дозволяють вивести на ринок достатньо якісний продукт. Отримані в рамках роботи результати можуть суттєво підвищити ефективність функціонування систем виявлення та розпізнавання об'єктів, стеження за рухомими об'єктами. Запропоновані технічні рішення сприятимуть збільшенню конкурентоспроможності вітчизняної оптико-електронної апаратури спостереження.

## **7. Потенційні користувачі.**

Результати роботи призначено для використання в системах розпізнавання і стеження в реальному часі. Специфіка таких систем передбачає їх використання насамперед для охорони, виявлення потенційних загроз, відслідковування рухомих цілей. Відповідно користувачами розроблених математичних моделей і розрахункових методів можуть бути вітчизняні підприємства, які створюють оптико-електронні системи спостереження видимого та інфрачервоного діапазону спектру, зокрема КП СПБ «Арсенал», КБ «Луч», ДП НДІ «Квант», ТОВ «Глобаллоджік Україна» (м. Київ), інші підприємства оптико-електронного приладобудування. Можливе використання розроблених методів профільними науково-виробничими фірмами з Китайської Народної Республіки.

## **8. Стан готовності розробки.**

Створена математична модель та розрахункові методи проектування КОС мають вигляд завершених математичних описів, алгоритмів і схем. Вони є готовими до безпосереднього використання у проектно-розрахункових роботах.

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

В рамках госпдоговору КП СПБ «Арсенал» передано для апробації математична модель, розрахункові методики когерентно-оптичних спектроаналізаторів і методи визначення їх похибок, схемотехнічні рішення складних оптико-електронних сканерів

впроваджено в рамках проекту НАТО (Грант НАТО SPS G5526 – «Виявлення вибухових слідів для Standex (EXTRAS)»), методи визначення основних параметрів тепловізійних об'єктів впроваджено в ТОВ «Трімен Україна» (Контракт № 1501 від 15.01.2018 р.).

#### 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.

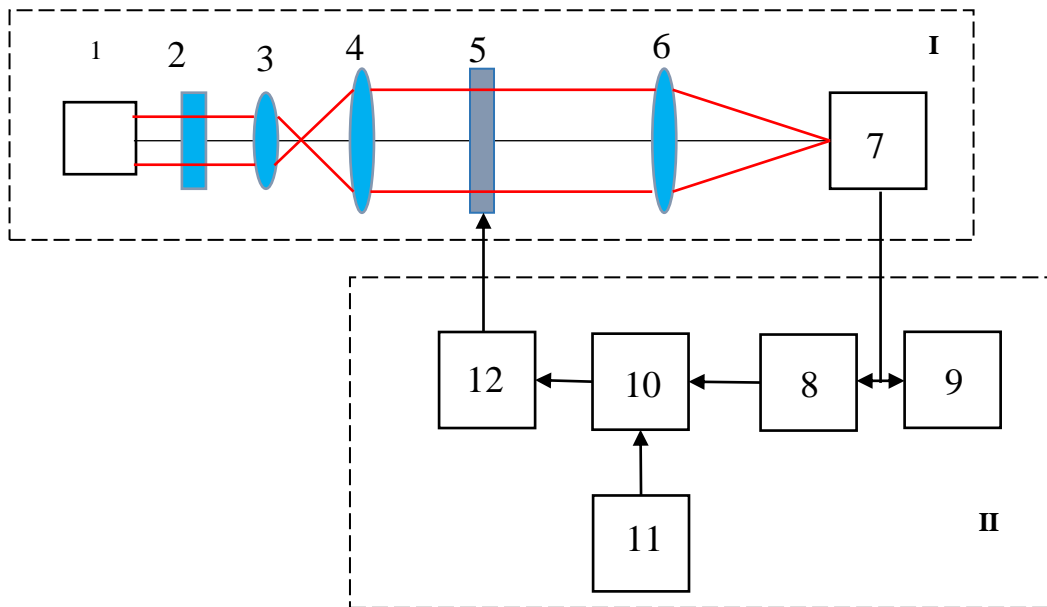


Рисунок 1 – Схема цифрового оптичного процесора для обробки тепловізійних і тепловізійних зображень в реальному масштабі часу: 1 - напівпровідниковий лазер, 2 - світлофільтр, 3, 4 - розширювач пучка, 5 - просторово-часовий модулятор світла, 6 - фур'є об'єктив, 7, 11 - цифрові камери, 8 - комп'ютер, 9 - монітор, 10 - пристрій формування і вводу просторового фільтра, 12 - блок керування

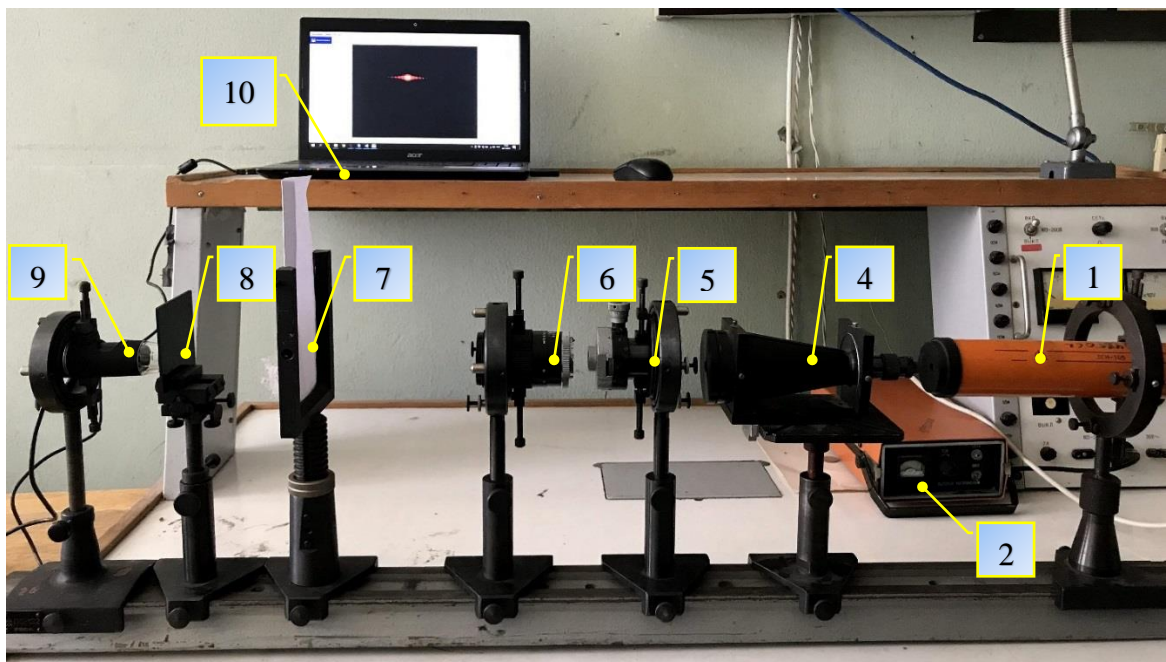


Рисунок 2 – Лабораторний макет когерентного оптичного спектроаналізатора: 1 – лазер, 2 - блок живлення, 4 - розширювач лазерного пучка, 5 - вхідний транспарант, 6 - фур'є-об'єктив, 7 - молочна пластинка (прозорий екран), 8 - світлофільтр, 9 - USB-мікроскоп, 10 - комп'ютер

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

### *Монографії*

1. 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.
2. 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.
3. І.О. Васильковська, В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик. Удосконалення методів проектування дифракційних лінз: монографія. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2020. – 158 с.

### *Підручники*

1. 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 та WoS*

1. Kolobrodov V. H., Tymchik G. S., Mykytenko V.I., Kolobrodov M.S. (студ.), Lutsiuk M.M. (студ.) Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal // Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia, 2018, Iss. 72, pp. 78–85.
2. Volodymyr Borovytsky Huygens–Fresnel principle and Abbe formula // Optical Engineering 57(9), 2018, 095104.
3. V. Borovytsky, O. Hudz (студ.), and V. Antonenko (студ.) The improved optical setup for Abbe-Porter experiment, Proc. SPIE 10375, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XVIII, 1037513, 2017.
4. 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.
5. Kolobrodov V.H., Tymchik G.S., 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.
6. Volodymyr Borovytsky and Oleksii Hudz (студ.) Abbe experiment with inclined grating // Proc. SPIE 10745, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIX, 1074512, 2018. doi: 10.1117/12.2320489.
7. V. Borovytsky Huygens-Fresnel principle and the spatial bandwidth of an optical system // Proc. SPIE. Vol. 10612, 2018, p.106120F.1-8.
8. Valentin H. Kolobrodov; Grygorij S. Tymchik; Mykyta S. Kolobrodov (студ.); Bogdan Y. Pinchuk (студ.) 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).
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Valentin H. Kolobrodov; Grygorij S. Tymchik; Mykyta S. Kolobrodov (студ.) 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).

13. Kolobrodov V.G., Vasylykova I.O., Tymchik G.S. Design of multi-order diffractive intraocular lenses / Proc. SPIE Optical Fibers and Their Applications, 2020, 1145608.

14. Igor G. Chyzh, Valentin G. Kolobrodov, Anatoly V. Molodyk, Volodymyr I. Mykytenko, Grygorij S. Tymchik Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system / Proceedings of SPIE, Volume 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; 115810K (2020).

15. Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I., Tymchik G.S. Technology of Infrared Radiation Polarizer / Proceedings of SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2020, 1145609.

#### *Докторські дисертації*

1. Докторська дисертація «Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень», Микитенко В.І., 03.03.2020 р., науковий консультант Колобродов В.Г.;

2. Докторська дисертація «Удосконалення методів проектування та контролю космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі», Тягур В.М., 01.12.2020 р., науковий консультант Колобродов В.Г.;

#### *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.**

Когерентно-оптичний спектроаналізатор, просторово-частотний спектр, обробка зображень