

**СЕКЦІЯ 2**  
**ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ.**  
**ФОТОНІКА**

УДК 681.37; 520.876

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ НА  
ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛІВ**

*Стрількова Т. О., Калмиков О. С., Лютюга О. П.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

*E-mail: [strelkova\\_t@ukr.net](mailto:strelkova_t@ukr.net), [als1kalmykov@gmail.com](mailto:als1kalmykov@gmail.com), [alex\\_lyt@ukr.net](mailto:alex_lyt@ukr.net)*

В інженерній практиці сучасних оптико-електронних систем в основі методів оптимального виявлення, як для прямого (некогерентного), так і для гетеродинного (когерентного), детектування лежать статистичні властивості реальних сигналів та завад на виході фотоприймача. Особливу роль при виявленні сигналів низької енергії відіграють зміни дисперсії вихідного потоку.

Опис статистичних особливостей вихідних сигналів показав, що при зміні енергетичних властивостей сигнальних та шумових компонент змінюються закони розподілу вихідних сигналів [1]. При виявленні сигналів низької енергії показники ефективності повинні враховувати зміни дисперсії вихідного потоку. Статистичний розподіл сигналів на виході фотоприймача при постійній інтенсивності описується законом Пуассона. При врахуванні випадкових флуктуацій сигнальної складової за допомогою корпускулярної моделі, дисперсія у вихідному сигналі, може збільшуватись, що в свою чергу може впливати на точність оцінки показників ефективності систем [2].

Доповідь присвячено порівняльному аналізу критерію ефективності систем – величини відношення сигнал/шум, розрахованого на основі різних підходів до опису сигналів та перешкод – корпускулярного та хвильового. Порівняльний аналіз показав, що запропоновані підходи дозволяють врахувати основні характеристики сигналів при розрахунку відношення сигнал/шум. За допомогою корпускулярної моделі враховано, що дисперсія у вихідному сигналі може збільшуватись, що, у свою чергу, може впливати на точність оцінки показників ефективності систем. Крім того, при використанні корпускулярного опису, на відміну від хвильового опису, величина відношення сигнал/шум має кінцеве значення, навіть при умові зменшення, або при повній відсутності завад.

*Ключові слова:* оптимальне виявлення, статистичні властивості.

**Література**

- [1] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Лютюга, и Т. А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.

- [2] T. Strelkova, A. Lytyuga, A. Kalmykov, G. Khoroshun, A. Riazantsev and O. Ryazantsev, “Influence of a signal description model on the calculations of the efficiency indicators of optoelectronic systems”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/5 (106), pp. 41-50, 2020.

УДК 681.37; 520.876

## АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ У ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЕНЕРГІЙ

*Стрелкова Т. О., Калмиков О. С., Литюга О. П.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

*E-mail: [strelkova\\_t@ukr.net](mailto:strelkova_t@ukr.net), [als1kalmykov@gmail.com](mailto:als1kalmykov@gmail.com), [alex\\_lyt@ukr.net](mailto:alex_lyt@ukr.net)*

Перспективним напрямом покращення та розробки алгоритмів виявлення сигналів в оптико-електронних системах є методи, які поєднують різні теоретичні методи оброблення даних і використовують додаткові статистичні характеристики як сигналів, так і перешкод. Такі методи й алгоритми, орієнтовані на розширення динамічного діапазону оптико-електронних систем і ґрунтуються на комбінованому використанні корпускулярних і хвильових теоретичних методів опису сигналів з урахуванням енергетичних і просторово-часових властивостей сигналів та перешкод [1, 2].

В доповіді представлено метод виявлення об’єктів, що поєднує кореляційний, різницевий, пороговий методи, а також оптимізацію міжкадрового оброблення послідовності аналізованих кадрів. За допомогою цього методу можна оцінити статистичні характеристики фонові компоненти, обчислити ймовірності виявлення. Представлений метод дозволяє знизити вплив шумової компоненти при використанні міжкадрового і внутрішньокадрового оброблення сигналів і збільшити енергетичні характеристики сигнальної компоненти пропорційно кількості аналізованих елементів розрізнення. Експериментальні дослідження, які ґрунтуються на аналізі енергетичних і просторово-часових характеристик модельних і натурних об’єктів із використанням оптико-електронної системи виявлення, показали, що оптимальне використання енергії просторового розподілу сигнальної складової і часу реєстрації дозволяє збільшити ефективність оптико-електронної системи за критерієм величини відношення сигнал/шум у 5–10 разів залежно від умов спостереження [3].

*Ключові слова:* ймовірність виявлення, міжкадрове оброблення.

### **Література**

- [1] А. И. Стрелков, С. В. Москвитин, А. П. Литюга, и Т.А. Стрелкова, *Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов*. Харьков, Украина: Апостроф, 2010.
- [2] В. Микитенко, «Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень», автореф. дис. доктор. наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.
- [3] T. Strelkova, A. Strelkov, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. S. Kalmykov, “Methods of

УДК 535.15, 621.382.2

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ СЕНСОР ДЛЯ ПРИЛАДІВ ГАЗОВОГО АНАЛІЗУ

*Кабацій В. М.*

*Мукачівський державний університет, Мукачево, Україна*

*E-mail: [lab47@ukr.net](mailto:lab47@ukr.net)*

Стрімкий розвиток сучасних технологій та систем оптичного зв'язку вимагають принципово нових підходів до розширення елементної бази сучасної оптоелектроніки, що відкриває перспективи створення надшвидкодійних схем інтегральної оптоелектроніки, розробки нових та удосконалення існуючих елементів, компонентів, приладів і систем обробки, збереження та відображення оптичної інформації.

Для вирішення актуальних задач, пов'язаних з контролем різноманітних газових речовин в екології, біотехнології, медицині, фармакології, виробництві продуктів харчування та побуті необхідна розробка і широке впровадження сучасних портативних газоаналізаторів, а також більш дешевих і зручних систем оптичної реєстрації та обробки інформації про стан досліджуваного об'єкта. Ключовими елементами сучасних оптико-електронних сенсорів є світлодіоди (СД) та фотоприймачі (ФП) на їх основі. В останні роки параметри СД і ФП суттєво покращились, однак проблема підвищення зовнішнього квантового виходу СД та спектральної чутливості ФП в середній інфрачервоній області спектра та узгодженості їх спектральних характеристик залишається актуальною.

Мета досліджень – створення оптико-електронного сенсора з покращеними характеристиками для вимірювання концентрації газу за рахунок підвищення зовнішнього квантового виходу СД та спектральної чутливості ФП.

Досліджувались СД і ФП, активні елементи (АЕ) яких розміщувались на підкладці корпусів ТО-18 або SMD. Активні елементи СД і ФП виготовлені на основі гетероструктур з *p-n*-переходами на базі твердих розчинів InAs/ InAsSb /InAsSbP/. Вони працюють при кімнатній температурі в спектральному діапазоні 2,0-5,0 мкм, де розміщені смуги фундаментального поглинання газів, основних забруднювачів навколишнього середовища [1, 2].

Суттєве покращення світлотехнічних параметрів СД і ФП, досягнуто завдяки нанесенню на їх АЕ об'ємного оптичного покриття заданої форми. Розрахована форма оптичного покриття (напівсфера або параболічна поверхня обертання) дозволяє внаслідок відбивання світлового потоку, що попадає на границю поділу оптичне покриття – повітря під кутом меншим деякого критичного кута падіння для даного оптичного середовища, фокусувати його вздовж оптичної осі АЕ. В якості матеріалу для оптичного покриття

використано багатокомпонентні склоподібні сплави із халькогенідних систем (Ge, Pb)–(Ga, As, Sb,)–(S, Se). Халькогенідні стекла (ХС) прозорі в широкій області спектра оптичного діапазону із заданим показником заломлення, мають великий питомий опір, забезпечують хорошу адгезію до матеріалу АЕ та корпусу, узгоджуються з їх коефіцієнтами термічного розширення і технологічні у виготовленні.

Спектри випромінювання СД та фоточутливості ФП до та після нанесення об’ємного оптичного покриття заданої форми показані на рис. 1.

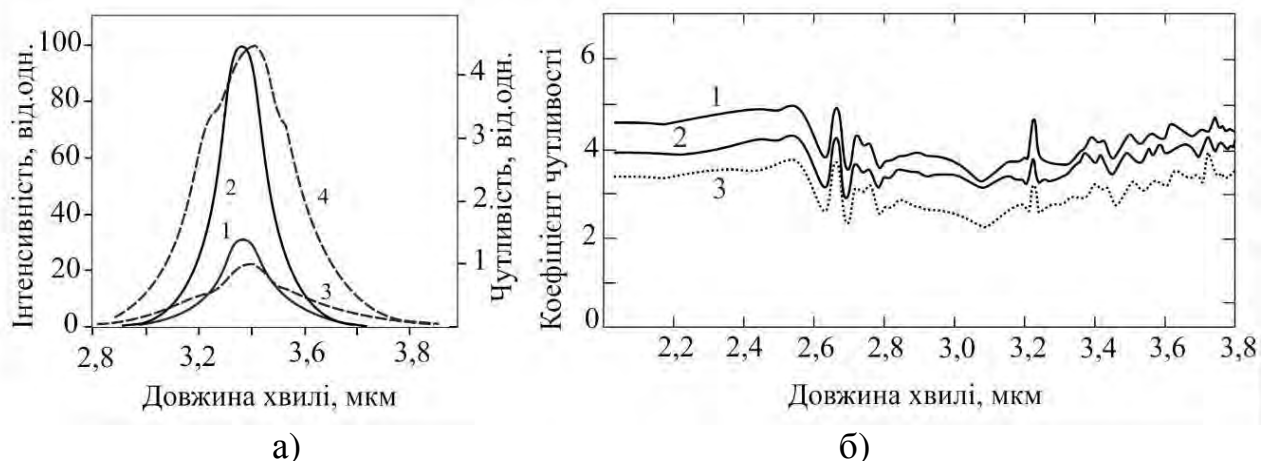


Рис. 1. Спектри випромінювання СД і фоточутливості ФП (криві 1, 3) до нанесення і (криві 2, 4) після нанесення оптичного покриття (а) та залежність чутливості ФП з довжиною хвилі в максимумі чутливості  $\lambda_{\text{max}}=3,4$  мкм від довжини хвилі падаючого на нього випромінювання (б): криві 1-3 відповідають різним номерам зразків

Використання в якості матеріалів для об’ємного оптичного покриття багатокомпонентних склоподібних сплавів із халькогенідних систем (Ge, Pb)–(Ga, As, Sb,)–(S, Se) дозволило підвищити ефективність роботи СД і ФП щонайменше в 2,5–5,0 разів по відношенню до дискретних світлодіодів та фотоприймачів, що випускаються промисловістю в спектральному діапазоні 2,0-5,0 мкм.

Конструктивні та технічні особливості розроблених СД і ФП дозволили запропонувати конструкцію оптико-електронного сенсора у вигляді інтегруючої сфери для вимірювання концентрації аналізованого газу з врахуванням неселективних втрат випромінювання та температурної стабілізації (рис. 2).

Оптико-електронний сенсор працює наступним чином.

Випромінювання від СД 6 і СД 7 потрапляє в порожнину кювети 1 у вигляді інтегруючої сфери, де відбиваючись та розсіюючись від стінок та світлорозсіювального екрану 5, що попереджає потрапляння прямих променів від СД 6 і СД 7 на ФП 8, взаємодіє або з повітрям чи газом, який не поглинає випромінювання від СД 6 і АЕ 7 (при калібровці ФП 8), або з газом, що аналізується (при вимірюванні його концентрації). Водночас, на стінках сфери встановлюється певний рівень освітленості, що пропорційний послабленню випромінювання в аналізованому газі. Після цього випромінювання від СД 6 і

СД 7 потрапляє на ФП 8. Сигнал на виході ФП 8 пропорційний величині падаючого на нього потоку випромінювання, а зміна інтенсивності випромінювання при проходженні через аналізований газ і відповідно зміна сигналу на його виході є мірою концентрації аналізованого газу.

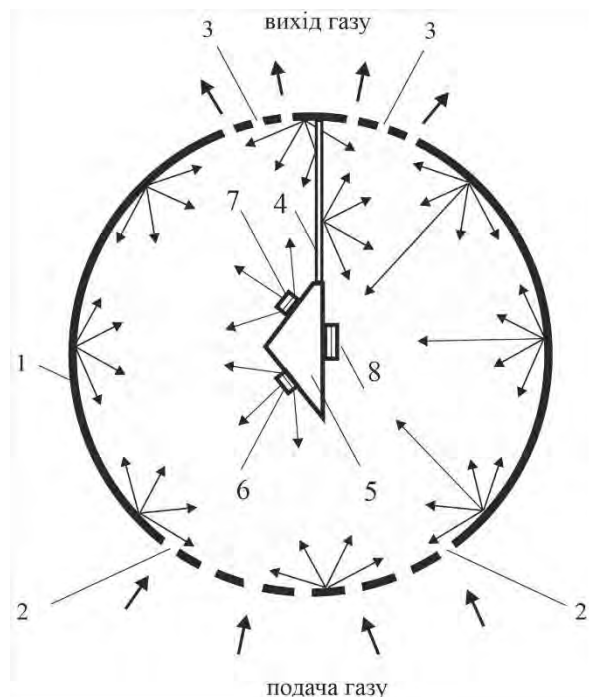


Рис. 2 Конструкція оптико-електронного сенсора для вимірювання концентрації аналізованого газу: 1 – корпус; 2, 3 – вхідний та вихідний отвори для проходження газу; 4 – дифузна розсіювальна світлова трубка; 5 – призмоподібна теплопровідна підкладка; 6, 7 – випромінюючі світлодіоди; 8 – фотоприймач

Світлорозсіювальний екран 5 у вигляді багатокутної правильної піраміди на своїх гранях містить СД 6 і СД 7, які здатні випромінювати в максимумах на довжинах хвиль узгоджених з довжиною хвилі в максимумі смуги власного поглинання аналізованого газу.

Модуляція світлового потоку забезпечується активацією СД змінним струмом величиною 200 мА та частотою до 100 кГц з тривалістю імпульсу 500 мкс.

Відношення сигнал/шум досягає не менше 100. Мінімальна вимірювана концентрація  $\text{CH}_4$  у повітрі була не менше 200–250 ppm, а мінімально зафіксована концентрація  $\text{CO}_2$  у повітрі складала 50–100 ppm.

*Ключові слова:* оптико-електронний сенсор, оптопара, світлодіоди, фотоприймачі, газовий аналіз, аналітичне приладобудування.

#### Література

- [1] М. А. Remennyi, N. V. Zotova, S. A. Karandashev, B. A. Matveev, N. M. Stus', G. N. Talalakin, "Low voltage epoxide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3,3–4,3  $\mu\text{m}$  spectral range", *Sensors & Actuators B: Chemical*, vol. 91, no. 1–3, pp. 256–261, 2003.
- [2] А. П. Астахова, А. С. Головин, Н. Д. Ильинская, К. В. Калинина, С. С. Кижаяев, О. Ю. Серебренникова, Н. Д. Стоянов, Zs. J. Horvath, Ю. П. Яковлев, "Мощные светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектроскопии метана ( $\lambda=3,3$  мкм)", *Физика и техника полупроводников*, т. 44, вып. 2, с. 278–284, 2010.

УДК 520.6.07

## ВЫБОР ЗЕРКАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Шанчук В. А., Артюхина Н. К.*

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

*E-mail: [art49@mail.ru](mailto:art49@mail.ru)*

В настоящее время активно развиваются области производства и науки, связанные с аппаратами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В их число входит космическое приборостроение, задачей которого является разработка, расчёт и производство космических телескопов, входящих в состав данных изделий.

В качестве оптических систем телескопов для таких аппаратов выбирают схемы Ричи-Кретьена, Корша или Мерсенна. Они состоят из главного и вторичного зеркал, а также корректора полевых аберраций: линзового в схемах Ричи-Кретьена и Мерсенна, и асферического зеркала в схеме Корша [1]. Оптическая схема Ричи-Кретьена применяется тогда, когда необходимо высокое светопропускание оптической системы, а также при расчёте и проектировании космического телескопа с диаметром главного зеркала более 1 м.

Однако в данной системе необходимо наличие светозащитных бленд, причем система работает в ограниченном спектральном диапазоне. Если же требуется, чтобы оптическая система работала в широком спектральном диапазоне, то тогда применяют схему Корша. Однако в ней также присутствуют недостатки в виде наличия экранирования центра поля зрения, наличия промежуточного изображения, формируемого главным и вторичным зеркалами, а также значительное падение качества формируемого оптической системой изображения при работе с большими угловыми полями.

В случае необходимости работы космического телескопа с большими угловыми полями, а также при необходимости наличия нескольких каналов для разных спектральных диапазонов, лучше всего применять афокальную схему Мерсенна. Её преимуществами являются: возможность работы с большими угловыми полями, отсутствие промежуточного изображения, а также большой рабочий размер светового пучка, что позволяет использовать наклонную плоскопараллельную пластинку со спектроделительным многослойным покрытием, для разведения каналов в оптической системе, и гораздо более низкими требованиями к чистоте её рабочих поверхностей.

### **Литература**

- [1] М. М. Русинов, *Композиция оптических систем*. 2-е изд. Москва, РФ: Книжный дом «ЛИБРКОМ», 2011. (Классика инженерной мысли: оптика и её приложения).

УДК 520, 681.7

КОМПЛЕКС НАУКОВОЇ АПАРАТУРИ КОСМІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ  
«АЕРОЗОЛЬ-УА»

<sup>1)</sup>Синявський І. І., <sup>1)</sup>Іванов Ю. С., <sup>1)</sup>Сосонкін М. Г., <sup>1)</sup>Осипенко Р. С.,

<sup>2)</sup>Оберемок Є. А., <sup>2)</sup>Міліневський Г. П., <sup>2)</sup>Данилевський В. О.

<sup>1)</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна;

<sup>2)</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

E-mail: [syn@mao.kiev.ua](mailto:syn@mao.kiev.ua), [yutiva@gmail.com](mailto:yutiva@gmail.com), [sosonkin@mao.kiev.ua](mailto:sosonkin@mao.kiev.ua), [roma-0sip@ukr.net](mailto:roma-0sip@ukr.net),  
[oya@univ.kiev.ua](mailto:oya@univ.kiev.ua), [genmilinevsky@gmail.com](mailto:genmilinevsky@gmail.com), [vdanylevsky@gmail.com](mailto:vdanylevsky@gmail.com)

Космічний експеримент «Аерозоль-УА» має на меті проведення низки досліджень впливу атмосферних аерозолів на клімат, отримання даних щодо фізичних характеристик, просторового та часового розподілів аерозолів в атмосфері Землі. Буде здійснено запуск на орбіту Землі спеціального супутника зі скануючим фотометром-поляриметром (СканПол) на борту для вимірювання детальних фізичних характеристик природних та антропогенних аерозолів і оцінки їхнього хімічного складу, який має супроводжуватись мультиспектральним іміджером-поляриметром (МСІП) для прив'язки даних скануючого поляриметра і визначення оптичних і фізичних характеристик аерозолу з широким полем зору [1].

Поляриметр СканПол призначений для вимірювання з високою точністю параметрів Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$  у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової до короткохвильової інфрачервоної області з центральними довжинами хвиль 370, 410, 555, 865, 1378 та 1610 нм в широкому діапазоні фазових кутів з фотометричною похибкою  $\leq 4\%$  та поляриметричною похибкою  $\leq 0.15\%$ .

Поляриметр СканПол складається з скануючої дводзеркальної системи, вимірювача параметрів поляризованого світла, пристроїв калібрування. Миттєве поле зору складає  $0.5^\circ$  та дозволяє сканувати підстилаючу поверхню вздовж польоту супутника в межах  $+50^\circ - 60^\circ$  від напрямку в надир.

Мультиспектральний іміджер-поляриметр (МСІП) є панорамним поляриметром з полем зору  $60^\circ \times 60^\circ$  та роздільною здатністю  $0.25^\circ$  і дозволяє визначати три перші параметри Стокса –  $I$ ,  $Q$ ,  $U$  з заявленою похибкою 1 %. МСІП складається з трьох ідентичних за будовою та принципом роботи спектральних поляриметричних модулів, що працюють у діапазонах 410 нм, 555 нм та 865 нм.

Авторами представлено теперішній стан розробки вказаних інструментів.

*Ключові слова:* космічний експеримент, атмосфера Землі, поляриметр.

**Література**

[1] I. Syniavskyi et al., “Aerosol-UA satellite mission for the polarimetric study of aerosols in the atmosphere”, *JQSRT*, vol. 267, pp. 107601. doi:10.1016/j.jqsrt.2021.107601.

УДК 520, 681.7

## МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ІМІДЖЕР-ПОЛЯРИМЕТР (МСІП): ПРИНЦИП РОБОТИ, ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА ПОЛЯРИМЕТРИЧНЕ КАЛІБРУВАННЯ

<sup>1)</sup>Синявський І. І., <sup>1)</sup>Іванов Ю. С., <sup>1)</sup>Сосонкін М. Г., <sup>1)</sup>Осипенко Р. С., <sup>2)</sup>Оберемок Є. А.

<sup>1)</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

E-mail: [syn@mao.kiev.ua](mailto:syn@mao.kiev.ua), [yutiva@gmail.com](mailto:yutiva@gmail.com), [sosonkin@mao.kiev.ua](mailto:sosonkin@mao.kiev.ua), [roma-0sip@ukr.net](mailto:roma-0sip@ukr.net),  
[ova@univ.kiev.ua](mailto:ova@univ.kiev.ua)

Представлено результати розробки та попередніх лабораторних тестів мультиспектрального іміджера поляриметра (МСІП). Поляриметр МСІП складається з трьох ідентичних за будовою та принципом роботи спектральних поляриметричних модулів, що працюють у діапазонах 410 нм, 555 нм та 865 нм та дозволяють визначати розподіли у растрі трьох перших параметрів Стокса –  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ . Поле зору поляриметра –  $60^\circ \times 60^\circ$ , роздільна здатність –  $0.25^\circ$ . Заявлені поляриметрична та фотометрична точності – 1 % та 4 %, відповідають сучасним іміджерам поляриметрів космічного базування для дослідження складу та стану атмосфери Землі. Конструкція поляриметра передбачає розділення вхідного поля зору за допомогою системи призм на чотири ідентичні частини, які спрямовуються у відповідні чотири субканали, що містять плівкові аналізатори з орієнтаціями  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $135^\circ$ , відповідно.

Після проходження аналізаторів субканалні зображення проєктуються на прямокутні ділянки єдиного матричного фотоприймача (рис. 1). Сигнали з фотоприймача використовуються для розрахунку перших трьох параметрів Стокса для кожного пікселя вхідного зображення. Параметри Стокса використовуються для оцінки розподілу інтенсивності (Intensity), ступеню лінійної поляризації (DoLP) та азимуту лінійної поляризації (AoLP) у вхідному зображенні (рис. 2). Для забезпечення коректності обрахунків параметрів Стокса було застосовано: алгоритм суміщення зображень у субканалах та компенсації дисторсії (алгоритм геометричного калібрування на тестовому стенді) та алгоритм для визначення та компенсації фотометричних і поляризаційних неоднорідностей субканалів (поляриметричного калібрування [1]). Зазначимо, що на фотометричні та поляризаційні неоднорідності субканалів поляриметра впливають оптичні характеристики його лінзових систем, призм, спектральних фільтрів, поляроїдів та фоточутливої матриці.

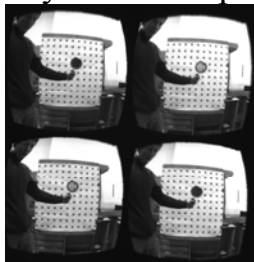


Рис. 1. Зображення матриці МСІП

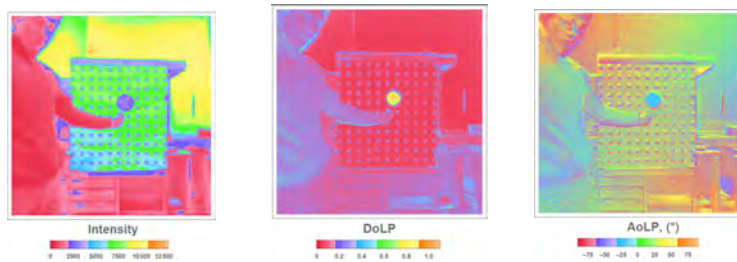


Рис. 2. Розподіли інтенсивності, ступеню та азимуту лінійної поляризації, отримані за допомогою каліброваного МСІП



*Ключові слова:* поляриметр, поляриметричне калібрування, геометричне калібрування.

**Література**

- [1] G. Milinevsky et al., “Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission”, *JQSRT*, vol. 229, pp. 2019.

УДК 621.384.3

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Сокол Б. В., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [sokolbohdan@ukr.net](mailto:sokolbohdan@ukr.net), [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)*

Проблема теплових відбитків створює значні невизначеності під час розпізнавання та виявлення об'єктів у зображенні. Для вирішення даної проблеми розглянемо декілька методів для усунення теплових відбитків. Дані методи аналогічні з методами вилучення відбитків у видимій області спектра за допомогою формул Френеля, що аналізують коефіцієнти відбиття випромінювання в ІЧ області спектру.

У даній роботі розглянуті методи виявлення теплових відбитків, що ґрунтуються на поляризаційних властивостях відбиття. Ці методи дають змогу виявити та вилучити складову відбитого випромінювання від об'єктів у зображення, щоб зменшити похибки при виявленні теплоконтрастних цілей [1].

Першим методом є використання конструкції матриці з поділом фокальної площини (DoFP) [2]. Пристрої DoFP виготовлені на основі мікроболометричних матриць із нанесенням на кожен піксель поляризатора у вигляді дифракційної ґратки, що забезпечує декілька переваг, порівняно з традиційними поляризаторами. Чотири чутливі площадки мають поляризатори з різною площиною поляризації і утворюють окремий піксель. Комбінуючи такі ґратки можна отримати повний набір параметрів Стокса в кожній області зображення.

Наступний метод ґрунтується на діленні амплітуди в каналі приймача випромінювання. Ця система складається з 4-х окремих камер, встановлених так, що єдиний об'єктив використовується з набором поляризаційних дільників променів, хвильових пластин й об'єктивів для отримання поляриметричного зображення. Камери одночасно фіксують 4 зображення, які дають змогу обчислити усі параметри Стокса.

Ще один із часто використовуваних методів – це обертання поляризаційних елементів перед об'єктивом камери. Цей підхід є відносно простим, як у дизайні системи, так й у відновленні даних. Однак очевидним недоліком є те, що за такої умови об'єкт спостереження та тепловізор повинні бути нерухомими, щоб уникнути руху між кадрами. На основі отриманої інформації з матриці створюються зображення Стокса.

Отже, в роботі розглянуто методи виявлення теплових відбитків, що дозволять в подальшому реалізувати один із цих методів для модернізації тепловізійної камери безпілотного літального апарату.

*Ключові слова:* поляризація, вектор Стокса, виявлення теплових відбитків.

#### **Література**

- [1] І. В. Карпенко, В. Г. Колобродов, Б. В. Сокол. "Поляризаційний метод виявлення теплоконтрастної цілі на фоні завад", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 1, с. 33-37, 2018.
- [2] V. Behzadnezhad et al., "Angle sensing LWIR detectors using coupled nano-antenna arrays" in *Proc. 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481117.

УДК 617.741-077.21

## **ОПТИЧНА СИСТЕМА ІНТРАОПЕРАЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА ОСЬОВОЇ ДОВЖИНИ ОКА**

*Чиж І. Г., Хрієнко К. С.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com), [katia.hrienko.1@gmail.com](mailto:katia.hrienko.1@gmail.com)*

При хірургічному лікуванні катаракти перед імплантацією інтраокулярної лінзи (ІОЛ) виконується доопераційна біометрія. Одним з її важливіших результатів є визначення осьової довжини ока – відрізка від рогівки до сітківки, значення якого використовується при розрахунку потрібної оптичної сили ІОЛ.

При щільній катаракті точне визначення осьової довжини ока буває проблематичним навіть при використанні акустичного луна-локаційного методу. Для розв'язання цієї проблеми нами запропоновано новий метод інтраопераційної біометрії, яка має здійснюватися під час проведення операції, а точніше після видалення патологічного кришталика.

Процедура інтраопераційної біометрії не повинна суттєво збільшувати час проведення операції, тому на вимірювання додається не більш однієї хвилини операційного часу. З огляду на цю вимогу метод, що нами пропонується, є автоматизованим за рахунок використання комп'ютерно-керованої варіо-лінзи, зображення головних площин якої за допомогою телескопічної системи Бадаля, утворює на поверхні рогівки віртуальний параксіальний компонент із змінною оптичною силою. При зміні оптичної сили  $\Phi$  варіо-лінзи, а значить і віртуального параксіального компонента, визначається те її значення, при якому на сітківці ока утворюється світлова пляма з найменшим середньо-квадратичним значенням її радіуса. Це значення  $\Phi$  дозволяє потім встановити довжину задне-переднього відрізка.

Показано, що для підвищення точності визначення  $\Phi$  потрібно використовувати ту ділянку функції залежності  $\Phi(U)$ , ( $U$  – електрична напруга, якою регулюється оптична сила варіо-лінзи), де функція  $\Phi(U)$  має найвищу

лінійність. Ця вимога може бути реалізованою тільки при використанні в оптичній системі вимірювача додаткової лінзи-адаптера. В роботі приведено алгоритм габаритного розрахунку всіх елементів оптичної системи вимірювача осьової довжини ока, в тому числі лінзи-адаптера, з урахуванням габаритів ока людини, потрібного діаметру вимірювальної зони на зіниці та конкретного вигляду функції  $\Phi(U)$ .

*Ключові слова:* інтраопераційна біометрія ока, вимірювання осьової довжини ока

УДК 535.247.4

## ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ДОВЖИНИ ХВИЛІ КОГЕРЕНТНОГО ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Налбандова В. П., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [vnalbandova@gmail.com](mailto:vnalbandova@gmail.com), [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)*

Вимірювання пікової довжини хвилі є одним із важливих критеріїв при оцінці безпеки лазерного джерела випромінювання за стандартами серії EN 60825 [1]. Довжина хвилі за стандартом є опорним параметром, що необхідний для точного визначення максимального допустимого рівня опромінення (maximum permissible exposure, MPE) та граничного допустимого рівня опромінення (accessible emission limit, AEL).

Лазер, як когерентне джерело, є монохроматичним джерелом випромінювання, тобто його оптичний спектр є лінійчатим. Для знаходження піку довжини хвилі використовуються такі прилади, як спектрометри, монохроматори, інтерферометри, спектрорадіометри [2] з точністю, яка задовольняє умови стандарту.

Під час роботи з вимірювання довжини хвилі за допомогою спектрометра Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR з роздільною здатністю 0,75 нм було виявлено, що перевищення порогу чутливості фотоприймача спектрометра провокує недостовірність результату у вигляді зміни графіку спектральної характеристики лазерного джерела випромінювання (рис. 1).

Під час експериментальної роботи було визначено, що дане явище спостерігається не лише за вимірювання потужних лазерних джерел випромінювання, але й за малопотужних джерел випромінювання з піковою потужністю до 50 мВт.

Тому при вимірюваннях виникає необхідність у використанні додаткового обладнання для ослаблення випромінювання, що не регламентовано серією стандартів.

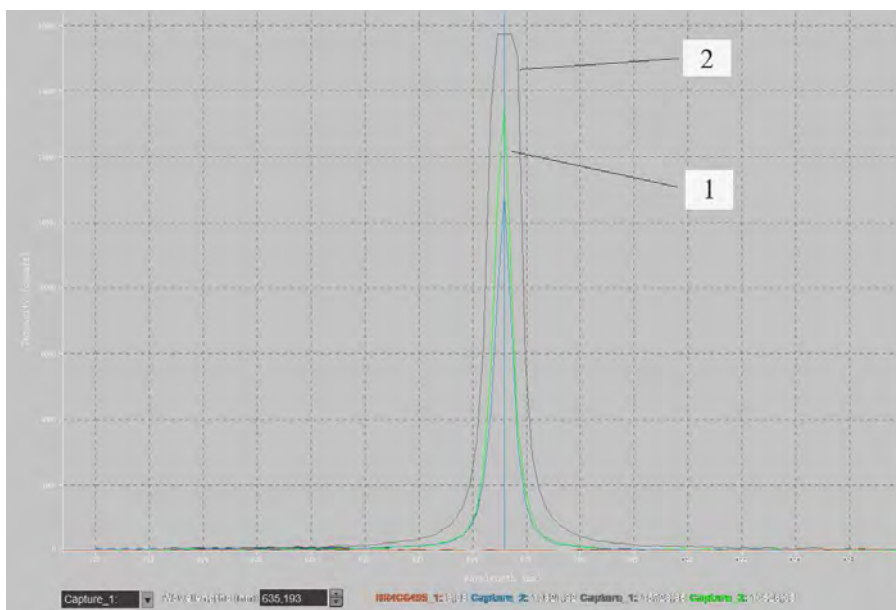


Рис. 1. Графік спектральної характеристики лазерного джерела: 1 – за нормального режиму роботи приймача; 2 – за перевищення порогу чутливості приймача

*Ключові слова:* довжина хвилі, когерентне джерело випромінювання, спектральна характеристика, спектрометр.

#### **Література**

- [1] ДСТУ EN 60825-1:2019 (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT). Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги.
- [2] В. Г. Колобродов. *Хвильова оптика. Частина 1. Електромагнітна теорія світла та інтерференція*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017.

УДК 681

## **MEASUREMENT OF INDICATRIX OF LEDS**

*Dmytro Averin, Volodymyr Borovytsky*

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
E-mail: [averindmytro@gmail.com](mailto:averindmytro@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

LEDs are the most common sources of radiation because they are economical, lightweight and durable. They are used in many devices and systems. Therefore, there is a need for fast and accurate measurement of LED's parameters. The main parameters are: total luminous flux, scattering angle, indicatrix, radiation power. In this paper, we consider several methods for measuring the LED indicatrix.

The most common and accurate method is the goniometric method [1]. It is described in many articles and books, so let's focus only on its counterparts. For example, VISHAY [2] uses a goniometric method to use an array of photometric heads that are arranged around a measuring LED and evaluate the results using a computer to speed up measurements.

Another method was presented by scientists from the Optics Institute of CSIC. The basic idea is similar to the goniometric method, but a CCD camera is added to the device to calibrate the LED relative to the photometric head [3].

The method presented in [4] uses a CCD camera as a radiation receiver, screen, and radiation source. The radiation source shines on the screen, and the camera captures the image of the spot from the LED on the other side of the screen. With the help of a computer, a 3D image of the shape of the indicatrix is built.

As you can see, there are not many methods of measuring the indicatrix, they are accurate, but most of them are time consuming and you can measure the indicatrix of only one LED. Therefore, we are developing another way. Thanks to it, you can make an initial assessment of the quality of the LED (which is sufficient for most tasks), you can evaluate the image from the matrix of LEDs, to assess the correct placement of LEDs in devices with a minimum of time.

*Keywords:* LED, measurements, radiation sources, indicatrix.

#### **References**

- [1] О. В. Круглов, В. Н. Кузьмин, К. А. Томский, “Измерение светового потока светодиодов”, *Светотехника*, № 3, с. 34-36, 2009.
- [2] OPTRONIC LABORATORIES, INC. LED Measurements/Revision: F, June 1997.
- [3] J. L. Velázquez, A. Ferrero, M. López, A. Pons, A. Villamarín, J. Campos, A. Sperling, “Angular distribution of the averaged luminous intensity of low power LEDs transfer standards”, *Proc. of SPIE*, vol. 8785 87858W-1. 18 November 2013. doi: 10.1117/12.2027039
- [4] Ivan Moreno, Ching-Cherng Sun, *Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: a rapid estimation*. IOP Publishing Ltd, 2009. doi: 10.1088/0957-0233/20/7/075306.

УДК 004.032.26

## IMPLEMENTATION OF OPTICAL NEURAL NETWORKS

*Avdieionok I. I., Borovytsky V. M.*

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
E-mail: [avdeionok.ira@gmail.com](mailto:avdeionok.ira@gmail.com), [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

An important task of neurocomputer technology is to develop flexible brain-like architectures of neurocomputers capable of a wide range of real-time applications. Convolutional neural networks are a powerful category of artificial neural networks that can extract the hierarchical features of the original data, providing significantly reduced parametric complexity and increasing prediction accuracy. Optical neural networks offer the promise of a sharp acceleration of computational speed with the help of available wide optical bands.

An Enlight256 optical processor has been developed, which has an electrical input and output signal and an optical core. For one, so 8ns duration, I multiply the vector from 256 elements by the matrix 256×256.

Implemented with the following elements:

VCSEL lasers forming a vector of 256 elements; Inter-optical device consisting of a matrix of 256 \* 256 spatial light modulators that work on reflection;

A line of 256 photodetectors.

Monash University, Australia, demonstrated a universal optical convolution accelerator running at 11.3 TOPS (trillions of operations per second, or tera-operations per second) for vector processing, and used a matrix approach to convert large-scale images of 250,000 pixels. The results are based on the simultaneous alternation of temporal, wavelength and spatial dimensions provided by the built-in microcombined source. The same equipment is then used to generate the optical CNN to recognize the complete 10-digit set of handwritten images. This network is capable of processing large-scale data and images at ultra-high computing speeds for real-time machine learning tasks, such as identifying persons in cameras, as well as pathology assessment for clinical scanning applications<sup>39,40</sup>.

Implementations proposed by Enlight256 and at Monash University are the most promising areas of development of optical neural networks

*Keywords:* brain modeling; neural network; neuromorphic electronic systems.

УДК 681.78

## ВПЛИВ КУТІВ ВІЗУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНИХ КОСМІЧНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА РАДІОМЕТРИЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ

*Колобродов В. Г., Пінчук Б. Ю.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net), [pinchuk.brus@gmail.com](mailto:pinchuk.brus@gmail.com)*

Останнім часом, в новинах все більш активніше висвітлюється космічна тематика та її актуальність. Однією із передових світових компаній, яка задає темп розвитку космічних технологій, можна виділити компанію Ілона Маска «SpaceX», та звернути увагу на те, що Україна веде технічні перемовини з даною компанією для запуску власного супутника дистанційного зондування Землі.

Створення і запуск власного космічного апарату для зйомки вимагає значних економічних затрат, а тому установлена на супутнику оптико-електронна система спостереження (ОЕСС) повинна створювати максимальну можливу якість зображення, бути багатofункціональною, мати значний час експлуатації тощо. Якщо у зв'язку із технологічними особливостями компонентів ОЕСС, система не може мати значний час експлуатації або системі у відповідний момент критично необхідно зробити зйомку певної області, яка знаходиться за межами поля зору, то пропонується проводити зйомку при довільних кутах візування. Отже, однією із сучасних вимог до космічних ОЕСС є необхідність зйомки при відхиленні візирної осі від надиру, що, в свою чергу, призводить до спотворення зображення.

Мета нашого дослідження полягала у вдосконаленні фізико-математичної моделі модуляційної передавальної функції (МПФ) системи «об’єктив – матричний приймач випромінювання» космічної ОЕСС при відхиленні візирної осі від надіру та дослідженню залежності радіометричного розділення від кутів візування.

Максимальні кути відхилення по тангажу  $\theta$  і крену  $\phi$ , які вказують деякі іноземні компанії, становлять  $\pm 45^\circ$ , але зазвичай це  $\pm 35^\circ$ , в тому числі, і державні українські підприємства. Зауважимо, що розрахунки залежності характеристик ОЕСС від кутів візування проводяться за умови, коли відхилення по тангажу і крену відбувається одночасно на однакові кути, тобто «по діагоналі»  $\theta = \phi$ . Аналіз відмінностей за критеріями якості між узгодженими системами для різних висот 500 км і 670 км, показав, що вони є незначними і щоб не загроможувати графіки «подібними» даними, представлені результати лише для висоти 670 км. Окрім розглянутих раніше моделей [1, 2], отримана фізико-математична модель додатково враховує вплив розрідження атмосфери і розмиття зображення, спричинене динамікою руху космічного апарату. Оскільки, не представляється можливим на одному графіку порівняти безліч МПФ системи залежно від кутів візування, то було запропоновано використовувати ефективну просторову смугу пропускання [3]. Так як в роботі неодноразово згадувалося про збільшення часу експлуатації космічної ОЕСС, то в дослідженні було порівняно охолоджувану матрицю «С615S LWIR» (фотонний приймач) із неохолоджуваною мікроболометричною матрицею «GST417V» (тепловий приймач) для оцінки їх можливої взаємозаміни без суттєвої втрати якості зображення і суттєвим збільшенням часу експлуатації.

На рис. 1. помітний значний вплив динаміки руху, але за рахунок кращого об’єктива в системі з тепловим приймачем GST417V, результати в напрямку польоту кращі в  $\sim 1.2$  рази і в  $\sim 1.6$  рази поперек польоту при зйомці в надірі. Аналіз ОЕСС з тепловим і фотонним приймачами, показує, що при максимальних кутах візування результати практично однакові, а відхилення візирної осі на кути візування більше  $\sim 30^\circ$  не є доцільним у зв’язку із поганою якістю отриманого зображення. Падіння ефективної просторової смуги пропускання до нуля в  $\sim 35^\circ$  і  $\sim 42^\circ$ , говорить про те, що відхиляючи ОЕСС на більші кути, в зображенні відбуватиметься елайзінг [4 – 7], який намагаються усунути за допомогою цифрової обробки.

На рис. 2, відображено залежність радіометричного розділення ОЕСС від кутів візування з невеликою відмінністю, що дає в  $\sim 1.4$  рази краще розділення за рахунок кращої швидкодії при використанні фотонного приймача, а при максимальних кутах відхилення відмінність між різними приймачами практично відсутня. Отже, аналіз результатів порівняння ОЕСС з різними типами приймачів показує доцільність заміни фотонного приймача тепловим без суттєвого погіршення якості зображення з перевагою підвищення часу експлуатації приладу.

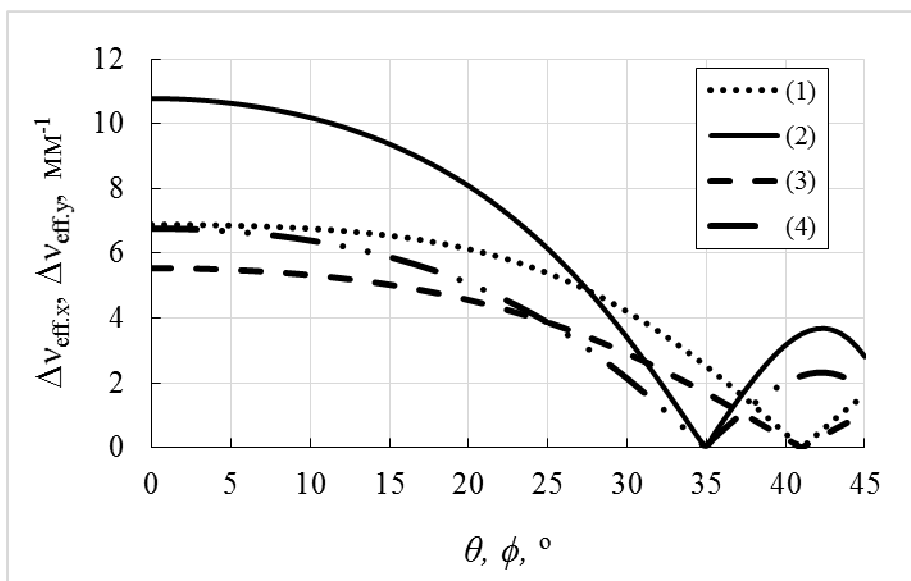


Рис. 1. Ефективна просторова смуга пропускання ОЕСС залежно від кутів візування: з матрицею GST417V 1) по осі  $Ox$  і 2) по осі  $Oy$ ; з матрицею C615S LWIR 3) по осі  $Ox$  і 4) по осі  $Oy$

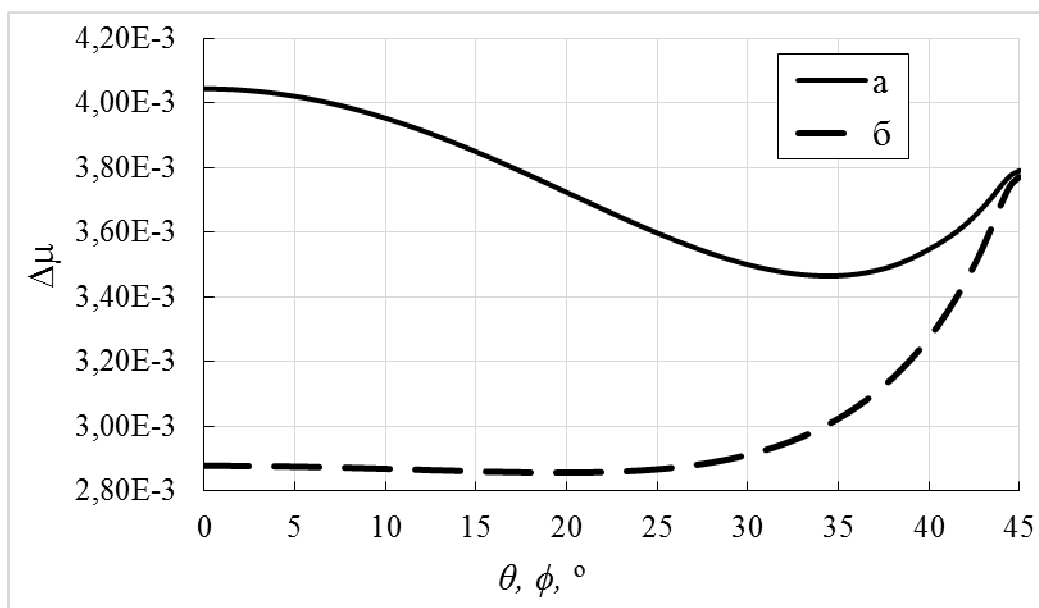


Рис. 2. Залежність радіометричного розділення від кутів візування для ОЕСС з матрицею а) GST417V б) C615S LWIR

**Ключові слова:** оптико-електронні системи спостереження, дистанційне зондування Землі, модуляційна передавальна функція, спотворення зображення, кути візування, радіометричне розділення.

#### Література

- [1] В. Г. Колобродов, В. М. Тягур, Б. Ю. Пінчук, “Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надіру”, *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 6, с. 66–80, 2018. doi: 10.20535/1810-0546.2018.6.149681.
- [2] V. G. Kolobrodov et al., “Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles”, *Proc. of SPIE*, vol. 10445, pp. 104450J-1–104450J-9, 2017. doi: 10.1117/12.2280909.



- [3] В. Г. Колобродов, “Оптимізація параметрів об’єктива і мікроболометричної матриці тепловізора”, *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 1(99), с. 91–95, 2015.
- [4] *Boreman, Glenn D.*, «Modulation transfer function in optical and electro-optical systems». SPIE Press, 2001.
- [5] *Robert D. Fiete* «Modeling the imaging chain of digital cameras». – SPIE, 2010, 225 pp, ISBN 978-0-8194-8339-3.
- [6] R. H. Vollmerhausen et al., *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. Washington: SPIE Press, 2010. doi: 10.1117/3.853462.
- [7] *Ronald G. Driggers, ect.*, «Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems» Second Edition. Artech House, 2012.

УДК 528.5

## НИТЯНИЙ ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ ДАЛЕКОМІР ІЗ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЮ НАСАДКОЮ

Чиж І. Г., Лісняк К. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com), [karinalisnak97@gmail.com](mailto:karinalisnak97@gmail.com)

Вимірювання дистанції до об’єкта здійснюють активними або пасивними методами. До активних відносять лазерні світло локаційні далекоміри. До пасивних – геометричні нитяні далекоміри з постійним паралактичним кутом і змінною базою, або з постійною базою, але із змінним паралактичним кутом.

Пасивні методи мають ту перевагу перед активними, що вони в процесі далекометрії є непомітними для противника. Але використання в таких далекомірах об’єктивів з фіксованою фокусною відстанню суттєво обмежує робочий діапазон приладу. Для розширення робочого діапазону нами пропонується нитяний далекомір, в якому замість об’єктива з фіксованою фокусною відстанню використовується трансфокатор, до складу якого входить зум-афокальна оптична система. Плавна зміна фокусної області трансфокатора досягається плавною зміною кутового збільшення зум-афокальної насадки, чим дозволяє процедуру вписування зображення об’єкту в систему вимірювальних нитей робити більш зручною і ефективною.

Дальність  $L$  до об’єкту за вказаним методом визначається за формулою

$$L = \frac{y}{b} \gamma_{\text{var}} \beta f',$$

де  $y$  – відомий розмір об’єкту, дистанція до якого визначається,  $\gamma_{\text{var}}$  – змінне кутове збільшення зум-афокальної насадки,  $\beta$  – лінійне збільшення зображення об’єкту на екрані монітору відносно зображення, сформованого оптичною системою далекоміру в площині матричного фотоприймача,  $f'$  – задня фокусна відстань стаціонарного об’єктива,  $b$  – відстань між двома горизонтальними лініями на екрані монітору. В процесі вимірювання дальності до об’єкту

визначається значення  $\gamma_{\text{var}}$ , при якому зображення об'єкту на екрані монітору вписується між нитями.

Важливим структурним елементом далекоміру є зум-афокальна насадка. В роботі наведені результати синтезу трьох та чотирьох компонентних зум-афокальних систем, які можуть використовуватися в тепловізійних далекомірах нитяного типу. Доведена перевага чотири компонентної зум-афокальної системи, яка полягає в сталому осьовому габариті і більшій лінійності передаточної функції механізму зсуву оптичних компонентів вздовж оптичної осі.

*Ключові слова:* нитяний далекомір, трансфокатор із зум-афокальною системою.

УДК 621:681.7

## ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТИВА КАМЕРИ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АВТОМОБІЛЕМ

*Стаднічук В. С., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [v.stadnichuk@kpi.ua](mailto:v.stadnichuk@kpi.ua)*

Щорічно приблизно 1,2 млн осіб гинуть на дорогах, що робить дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) основною причиною смертності [1]. Щоб уникнути зіткнення транспортних засобів, необхідно дотримуватися безпечної відстані до різних об'єктів. Зараз для оцінювання відстані використовують вимірювальні технології, такі як ультразвукове визначення відстані, радар міліметрового діапазону, LIDAR. Однак одним із найпростіших, надійних і недорогих джерел інформації є цифрова камера, що працює у видимому діапазоні. Крім визначення відстаней, камера може виконувати цілий спектр завдань, таких як визначення перешкод і їхнього розміру, визначення виїзду за межі смуги руху, розпізнавання дорожніх знаків і світлофорів.

З розвитком систем допомоги водієві на основі камер і систем автономного водіння багато компаній, що виробляють приймачі випромінювання (ПВ), почали створювати матриці високої роздільної здатності для автомобілів.

Важливим аспектом використання камер високої роздільної здатності в автомобілях є розпізнавання та супроводження об'єктів. Точне розпізнавання дорожніх знаків залежить від алгоритму розпізнавання, а також цифрової роздільної здатності їх зображень.

Якщо зображення дорожнього знаку має займати  $32 \times 32$  пікселі в площині зображення, фізичний розмір цього зображення має становити  $72 \times 72$  мкм для приймача Sony IMX324. Будемо вважати, що відстань до об'єкта становить 200 м, то для дорожнього знаку розміром  $0,75 \times 0,75$  м ефективна фокусна відстань об'єктива має становити 19,2 мм, що розраховується з використанням

тригонометричних співвідношень, показаних на Рис. 1. Це призводить до діагонального поля зору близько  $28,3^\circ$  із ПВ Sony IMX324.

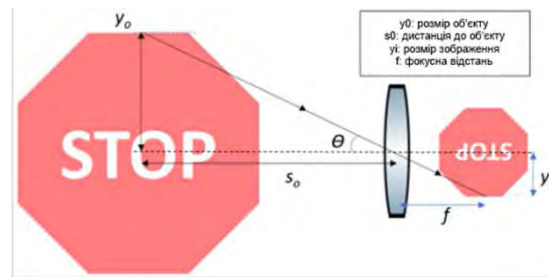


Рис. 1. Спрощена схема для розрахунку параметрів об'єктива

За ефективної фокусної відстані 19,2 мм і розміру пікселя 2,25 мкм гіперфокальна відстань для об'єктива  $f/2$  становить 82 м, а для об'єктива  $f/1,6$  – 102 м.

Щоб задовольнити вимоги до розв'язання атермальних умов експлуатації для автомобільної камери дальнього радіуса дії, за основу було взято п'ятилінзовий об'єктив [2] й оптимізовано його до вимог дослідження з кращим склом Шотта [3] показаний на Рис. 2.

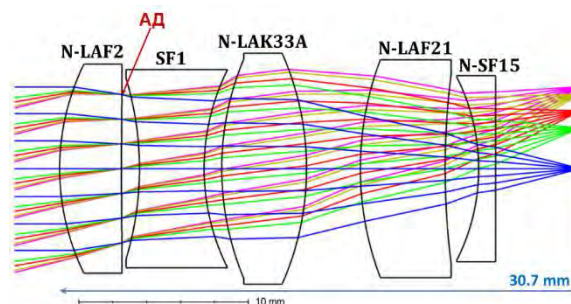


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції багатоелементного об'єктива

Автомобільні камери зазвичай мають фіксований фокус, а камери, спрямовані вперед, зазвичай потребують відносно великих фокусних відстаней для надання інформації про віддалені об'єкти. Оптична система для цих камер повинна забезпечувати високу роздільну здатність, а також працювати в широкому діапазоні температур довкілля. Тому розробка пасивно атермічних об'єктивів має вирішальне значення.

*Ключові слова:* автомобільна система активної безпеки; камера високої роздільної здатності; атермальний об'єктив.

#### Література

- [1] T. Toroyan, “Global status report on road safety 2015,” WHO, Geneva, Switzerland, WA 275, 2015.
- [2] F. E. Sahin, “Lens design for active alignment of mobile phone cameras,” *Optic. Eng.*, vol. 56, no. 6, p. 065102, 2017. doi: 10.1117/1.OE.56.6.065102.
- [3] F. E. Sahin, “Long-range, high-resolution camera optical design for assisted and autonomous driving,” *Photonics*, vol. 6, no. 2, pp. 73, 2019. doi: 10.3390/photonics6020073.

УДК 623.624.2

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРА ДЛЯ НАПІВАВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ РАКЕТ

*Кучеренко О. К.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [oleg.k.kucherenko@gmail.com](mailto:oleg.k.kucherenko@gmail.com)*

На сучасному етапі найбільш ефективним видом високоякісного озброєння з оптоелектронними засобами є протитанкові ракетні комплекси (ПТРК). Згідно світовим прогнозам ці комплекси, безперервно удосконалюючись, будуть знаходитись на озброєнні різних країн до 2030 р. Серед цих ПТРК велике місце займають ПТРК з лазерно-променевими системами наведення (ЛПСН) ракет.

Принцип дії ЛПСН полягає у формуванні інформаційного поля керування ракетою, в кожній точці якого визначаються дані про кутові координати ПТРК відносно лінії прицілювання, визначенні цих координат на ракеті шляхом аналізу лазерного випромінювання, що сприймається фотоприймальним пристроєм (ФПП), який встановлений у хвостову частину ПТРК.

Для передачі команд керування на ракету в ЛПСН можуть бути використані напівпровідникові імпульсні лазери, що мають енергетичний потенціал 2–3 Дж і працюють на довжині хвилі 0,9 мкм. В якості фотоприймача у ФПП використовуються позиційно-чутливі фотоприймачі з такими основними характеристиками: довжина хвилі - 0,9 мкм; токова чутливість - 0,6 А/Вт; темновий струм - 0,5 – 1,0 нА; розмір чутливої зони -  $12 \times 12$  мм<sup>2</sup>; похибка визначення положення плями випромінювання 40-80 мкм.

При проектуванні ЛПСН постає питання визначення мінімальної потужності лазерного випромінювання для забезпечення необхідного співвідношення сигнал/шум ФПП. Мінімізація вказаного співвідношення запобігатиме можливості передчасного виявлення противником ЛПСН на етапі наведення ракети по лазерному променю.

При проведенні досліджень враховувались такі фактори:

- кутові розміри індикатриси випромінювання напівпровідникового лазера;
- характеристики оптичної системи колімації лазерного випромінювання;
- залежність сили випромінювання лазера від довільного кута в межах чутливої площини позиційно-чутливого фотоприймача;
- взаємодія лазерного випромінювання з атмосферою;
- змінна відстань від лазера до ракети;
- можливість створення завад для ЛПСН.

Математичне моделювання проводилось на основі даних і відомостей про сучасні, ті, що модернізуються, та перспективні протитанкові засоби для типових числових характеристик ЛПСН закордонних країн. Отримані результати дозволили сформулювати вимоги до потужності лазерного випромінювання у ПТРК.

*Ключові слова:* протитанковий ракетний комплекс, лазерно-променева система наведення, математичне моделювання, потужність лазерного випромінювання.

UDC 519.6: 681.75

## ZOOM OPTICAL SYSTEM WITH EXTENDED PARAMETERS FOR RIFLESCOPE

<sup>1)</sup>*Sokurenko V. M. and* <sup>2)</sup>*Sokurenko O. M.*

<sup>1)</sup>*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
Kyiv, Ukraine;*

<sup>2)</sup>*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [sokurenko2@meta.ua](mailto:sokurenko2@meta.ua)*

Modern high-quality riflescopes can contain quite complex zoom optical systems, the development of which requires serious efforts, computer power, as well as time. Traditionally, the optical design process involves performing first-order design, aberration synthesis of optical components, and final optimization of a whole optical system.

However, the development of such optical systems can be seriously complicated when they must deliver the high image quality and provide extended functional parameters (like the high zoom ratio and the extremely long eye relief) under the limited total number of lenses.

To perform automated parametric synthesis, the appropriate computer program PODIL has been applied.

The design technique implemented in this program is based on one of modern global optimization algorithms. It can take into account a wide variety of user-defined boundary constraints on prescription parameters, overall dimensions, various aberrations, etc. The program enables to carry out design of multi-lens zoom optical systems in an automated mode.

Fig. 1 presents an optical schematic diagram of the developed zoom riflescope. The optical system provides the magnification range 5-25 $\times$ . It has the front focal plane (F1), the entrance pupil diameter 60 mm, the overall length 390 mm, and the eye relief 106 mm. The field of view of the riflescope varies from 3.26 $^{\circ}$  to 0.83 $^{\circ}$ .

The aberration analysis indicates that the designed zoom system delivers the high image quality. In five established zoom positions, the rms-values of output angular aberrations do not exceed 0.9' for the primary wavelength (0.555  $\mu\text{m}$ ) and 1.5' for the whole spectral range (0.47-0.656  $\mu\text{m}$ ).

The report presents the results of research and proposes several practical recommendations that may be useful for optical designers.

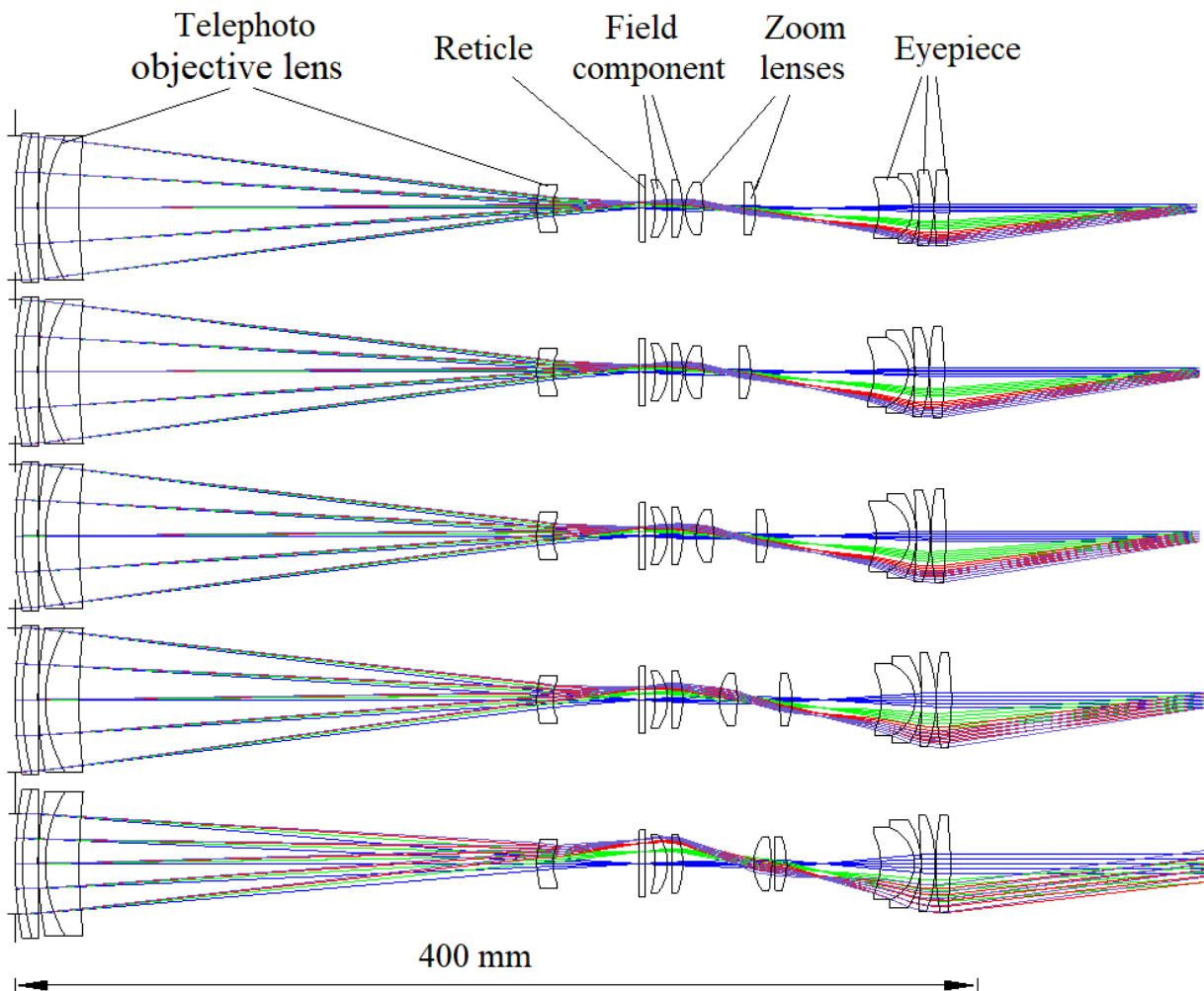


Fig. 1. Optical layout of the developed zoom riflescope. The shown five zoom configurations correspond to magnifications 25 $\times$ , 20 $\times$ , 15 $\times$ , 10 $\times$ , and 5 $\times$ , respectively.

*Keywords:* riflescope, zoom optical system, automated design, eye relief, magnification.

УДК 623.4.051

## МОДЕЛЬ ВИКОНАННЯ БОЙОВОЇ ЗАДАЧІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОПТИЧНИХ ПРИЦІЛІВ

<sup>1)</sup>Микитенко В.І., <sup>2)</sup>Сенаторов В.М.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,

<sup>2)</sup>Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, Київ, Україна,

E-mail: [v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua](mailto:v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua); [v.senatorov1945@i.ua](mailto:v.senatorov1945@i.ua)

Ймовірна модель функціонування зразків озброєння протиборчих сторін, що існує, встановлює вірогідність перемоги однієї з сторін, виходячи з даних

про ефективний потік пострілів та тривалість функціонування (пострілів). Однак цій останній операції виконання бойової задачі передують операції виявлення та розпізнавання цілі і прицілювання. Усі ці операції виконуються за допомогою оптичних стрілецьких прицілів. Відмова прицілу під час виконання будь-якої операції унеможливує виконання бойової задачі. Тривалість виконання кожної з цих операцій впливає на вірогідність перемоги однієї з сторін. Наприклад, якщо одна з протиборчих сторін виявила і розпізнала іншу сторону (ціль) за менший час, то (при потенційно рівних потоках пострілів) ця сторона буде мати перевагу за рахунок того, що першою розпізнала ціль, прицілилась і забезпечила більшу тривалість функціонування.

Таким чином ймовірнісна модель функціонування зразків озброєння протиборчих сторін повинна також враховувати ймовірності виявлення і розпізнавання цілі та ймовірність коректного прицілювання (спрямованість каналу ствола зброї в точку прицілювання) [1].

Виходячи з теорії випадкового пошуку накопичена в часі ймовірність виявлення і розпізнавання цілі залежить від кутового розміру зони пошуку, видимого кутового розміру цілі на виході прицілу і її контрасту. Якщо проаналізувати оптичну схему сучасного прицілу, то можна зазначити, що перевагу матиме та сторона, яка використовує приціл із більшим збільшенням і має менший власний контраст.

Ймовірність коректного прицілювання визначається: стабільністю положення лінії візування (прицілювання) відносно початкового положення в ході виконання бойової задачі в умовах високих динамічних навантажень на приціл, незмінністю положення лінії візування при перестановці прицілу на штатне базове місце, не зміщенням лінії візування при зміні режимів роботи прицілу.

В доповіді наголошується на важливості контролю засобів прицілювання з точки зору надійності в процесі виробництва із застосуванням спеціальної контрольно-юстувальної апаратури [2] і динамічного стенду. Розглядаються результати структурного синтезу цієї апаратури.

*Ключові слова:* бойова задача, оптичний приціл, лінія візування, ймовірність.

#### **Література**

- [1] Н. В. Сенаторов, А. В. Гурнович, Ю. В. Лагно, В. И. Микитенко, “Оценка эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия с оптическим прицелом”, *Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал*, - Киев: НТЦ АСВ.- №1(14). – с. 4-7, 2005.
- [2] В. М. Сенаторов, О. Д. Мельник, В. І. Микитенко, “Оптико-електронний комплекс контролю положення лінії візування оптичного прицілу”, *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, Вип. 58(2), с. 15-22, 2019.

УДК 535.42

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЮЧИХ АПАРАТІВ

*Васильковська І. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [inna\\_kuchugura@ukr.net](mailto:inna_kuchugura@ukr.net)*

Останнім часом безпілотні літальні апарати (БПЛА) або, як ще їх називають дрони, набувають широкого розповсюдження, починаючи від аматорської фото- та відеозйомки в побуті та закінчуючи воєнним призначенням для розвідки, або навіть застосуванням в аграрній сфері для контролю посівів сільськогосподарських культур. Наразі БПЛА є універсальними та незамінними засобами в багатьох сферах людської діяльності.

Оскільки безпілотні технології використовуються для вирішення дедалі складніших і різноманітніших задач, підвищуються вимоги і до систем технічного зору, якими вони оснащені. Зокрема це стосується розробки оптичних компонентів та оптичних систем для корисного навантаження БПЛА. Основними вимогами є мінімізація масо-габаритних характеристик і розширення спектрального діапазону. Завдання виробників полягає у розробці та виготовленні компактних, легких лінз. Водночас, не повинна знижуватись якість створеного ними зображення.

Поставлені технологічні вимоги можуть задовольнити інноваційні оптичні конструкції, такі як дифракційні лінзи. Завдяки своїм унікальним властивостям вони можуть значно зменшити і полегшити конструкцію та покращити якість зображення. Основна ідея полягає у заміні складного багатолінзового зображуючого об'єктива однією дифракційною лінзою (ДЛ). У цьому випадку недостатньо високу якість зображення можна підвищити за допомогою подальшої цифрової обробки. При використанні дифракційної зображуючої оптики основна проблема полягає у значному хроматизмі. Проте говорять не про абераційні спотворення, а швидше про окремі зображення, просторово розділені для різних довжин хвиль. Крім зміщення фокусу, спостерігається також зниження дифракційної ефективності для різних довжин хвиль. На практиці цифровими методами компенсувати таку значну хроматичну аберацію неможливо. Тут на допомогу приходять багатопорядкові дифракційні лінзи (БПДЛ), які відрізняються від звичайних дифракційних лінз товщиною. Також оптична сила БПДЛ залишається постійною для декількох дискретних довжин хвиль. Таку особливість використовують для ефективної корекції хроматичної аберації. Зображення, отримане за допомогою БПДЛ, на відміну від отриманого ДЛ, підлягає ефективній цифровій корекції з усунення хроматичної аберації.

У проведеному дослідженні аналізуються можливі конструкції таких лінз для використання безпілотними літальними апаратами.

*Ключові слова:* дифракційна лінза, безпілотний літальний апарат.