

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

УДК 623.442.4

**КОЛІМАТОРНИЙ ПРИЦІЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КУЛЕМЕТНОЇ УСТАНОВКИ**

<sup>1)</sup>Сенаторов В. М., <sup>1)</sup>Гурнович А. В., <sup>1)</sup>Мельник Б. О., <sup>2)</sup>Білокур М. О.

<sup>1)</sup>Центральний НДІ озброєння та військової техніки ЗСУ, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Центральне управління військової освіти Генерального штабу ЗСУ, Київ, Україна

E-mail: [v.senatorov1945@i.ua](mailto:v.senatorov1945@i.ua)

За даними [1] військовослужбовці Національної гвардії України успішно застосовують розроблену ними кулеметну установку на пікапі з двома кулеметами ПКТ і зенітним кільцевим прицільним пристроєм для знищення дронів-камікадзе «Шахед-136» (рис. 1).



Рис.1. Кулеметна установка [1]

Згідно до [2] характеристики кулемету ПКТ:

- практична скорострільність 250 пострілів на хвилину (4 постріли за секунду),
- дульна швидкість 855 м/с,
- кількість патронів в стрічці 250 (60 секунд безперервної роботи кулемету).

При таких характеристиках дистанція між кулями в польоті сягає 213 м. При окомірному способі визначення ракурсу і дальності до цілі, ця обставина зменшує

вірогідність ураження БпЛА при одночасній активації кулеметів. Як видно з фото, базова відстань між стволами  $\approx 600$  мм. При цьому кулеметна установка ефективніше діятиме при фланговому і скісному русі цілі, ніж при фронтальному русі малогабаритної цілі.

На основі вищезазначеного формуються пропозиції авторів щодо вдосконалення кулеметної установки Національної гвардії України.

1. Опрацювати можливість неодноразової активації кулеметів. Затримка активації 0,125 с.

2. Ввести в склад кулеметної установки пристрій визначення дистанції до дрону-камікадзе «Шахед-136»  $D_y$  на кшталт російського пристрою «Лира» [3]. Тоді при використанні пристрою випередження, виражене у корпусах БпЛА, розраховується за формулою  $0,0175D_y$ . Зауважимо, що пристрій «Лира» забезпечує найбільшу точність вимірювання дальності при фланговому русі цілі ( $\sin(q) = 1$ ).

3. Використовувати коліimatorний прицільний пристрій (КПП) замість зенітного кільцевого для прискорення прицілювання.

На конференціях, які проводились у Національній академії Національної гвардії України, автори висловлювали загальні погляди на створення перспективного КПП [4, 5]. Тому тут доцільно розглянути процес автоматизації прицілювання з використанням КПП.

Для автоматичного розрахунку кута випередження  $\psi$  необхідно знати проєкцію ракурсу на горизонтальну площину  $q'$ , похилу дальність до цілі  $D$  і висоту цілі над поверхнею землі  $H$ . Останню можна розрахувати добутком  $H = D \sin(\beta)$ , де  $\beta$  – кут місця цілі.

Як відомо, при візуальному спостереженні повітряної цілі з землі величина  $\sin q'$  визначається окомірним способом за видимим скороченням довжини фюзеляжу цілі в четвертих долях одиниці. Похила дальність до цілі  $D$  визначається лазерним далекоміром. Для відображення кута випередження  $\psi$  необхідно використовувати оптико-електронний КПП замість зенітного кільцевого прицільного пристрою і визначати кут місця цілі  $\beta$ . Задля цього достатньо на горизонтальній осі повороту кулеметної установки встановити потенціометр зворотного зв'язку, вихід якого з'єднати з процесором.

Останні досягнення мікроелектроніки в області створення рідинно-кристалічних індикаторів (наприклад, матриця 8K4K D-ILA має розмір пікселя  $a=4,8$  мкм [6]) створюють передумови для розробки КПП на новій елементній базі [5]. Згідно дослідженню [7] кут  $\psi$  має максимальне значення 52,6 мрад по горизонталі при  $\beta=90^\circ$ . Тоді поле зору  $2\omega$  КПП має бути не менше  $6^\circ$  по горизонталі. А горизонтальна складова лінійного розміру індикатору  $2m$

визначається формулою  $2m = 2f' \times \text{tg}(3^\circ)$ , де  $f'$  – фокусна відстань об'єктиву, і, наприклад, при  $f'=50$  мм:  $2m=5,24$  мм або 1092 пікселя.

Використання рідинно-кристалічного (або OLED) індикатору з блоком управління в якості формувача прицільного знаку одночасно вирішує проблему «холодного» пристрілювання: дискретне зміщення зображення прицільного знаку на один піксель веде до зміни його кутового положення на величину  $a/f'$ . Наприклад, при  $f'=50$  мм і  $a=4,8$  мкм знак зміщується на 0,0001 МОА, що набагато перевищує вимоги до КПП щодо «холодного» пристрілювання з використанням ствольного коліматора і можливо використовувати індикатор з більшим розміром пікселя.

На рис. 2 зображено структурну схему прицільної системи, яка реалізує ці ідеї.

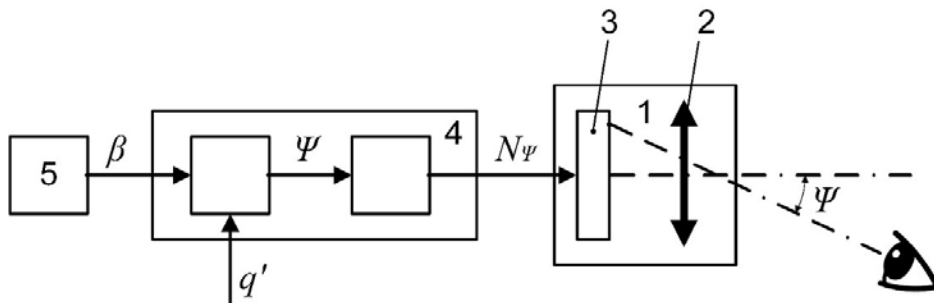


Рис. 2. Структурна схема прицільної системи кулеметної установки: 1 – КПП, 2 – об'єктив КПП, 3 – індикатор з системою управління, 4 – процесор, 5 – потенціометр зворотного зв'язку

Для високої надійності КПП 1 має бути біноклярним найпростішої конструкції: об'єктив 2, в фокальній площині якого встановлено індикатор з блоком управління 3. В такому разі навідник-оператор одним оком спостерігає інформацію, сформовану індикатором 3, а другим оком – оточуючий простір з ціллю. Суміщення зображень відбувається в мозку людини.

Згідно цієї структури командир і навідник-оператор діють одночасно. Командир за допомогою біноклю визначає ракурс дрону-камікадзе «Шахед-13б»  $q'$  (0/4, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4) і вводить це значення в процесор 4. Навідник-оператор в той же час розвертає кулеметну установку по горизонту і вертикалі та суміщає центральну точку прицільного знаку, сформованого індикатором 3 КПП 1, з ціллю. Сигнал з потенціометра зворотного зв'язку 5, що відповідає куту місця цілі  $\beta$ , вводиться в процесор 4. Сигнал з лазерного далекоміру (на рис. 2 не показаний) також вводиться в процесор 4. Процесор 4 послідовно розраховує висоту цілі над поверхнею землі  $H$ , кути  $q$  і  $\psi$  і номер пікселя  $N_\psi$  на індикаторі 3, що відповідає цьому куту  $\psi$ , за формулою

$$N_\psi = \pm \psi f' / \alpha.$$

**XXIII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 14-15 травня 2024 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна**

Як результат, в полі зору навідника-оператора відображаються дві точки обабіч центральної точки. Для того, щоб кутовий розмір точок задовольняв вимогам до КПП (2 МОА), вони повинні формуватися  $(0,002f'/a) \times (0,002f'/a)$  пікселями. Наприклад, при  $f'=50$  мм,  $a=4,8$  мкм і  $\psi=20$  мрад маємо:  $N_{\psi=20}=208$ -й піксель в строчці ліворуч і праворуч центрального пікселя, а точки прицільного знаку формуються 20-ю строчками з 198-ого по 218-й піксель в кожній строчці.

Навідник-оператор повторно швидко розвертає кулеметну установку по горизонту і вертикалі, суміщає з ціллю бокову точку прицільного знаку, обрану в залежності від напрямку руху цілі, і активує кулемети. Для визначення поправки на зниження куль необхідно використовувати трасуючі кулі.

**Ключові слова:** кулеметна установка, коліimatorний прицільний пристрій, дрон-камікадзе.

**Література**

- [1] Український погляд. (2022, Листоп. 7). *Бійці Нацгвардії створили установку з кулеметами ПКТ для знищення безпілотників противника*. [Онлайн]. Режим доступу: <https://ngu.gov.ua/bijczi-naczgvardii-stvoryly-ustanovku-z-kulemetamy-pkt-dlya-znyshhennya-bezpilotnykiv-protyvnyuka>.
- [2] Вікіпедія. (2022, Трав. 21). *Кулемет Калашникова* [Онлайн]. Режим доступу: <https://www.wikipedia.orh/wiki>.
- [3] ГУ боевой подготовки ВС рф, «Методика обучения ведению огня по беспилотным летательным аппаратам из стрелкового оружия», Москва, рф, 2018.
- [4] В. М. Сенаторов, А. В. Гурнович, “Коліimatorний приціл для потреб Національної гвардії України”, на *Наук.-практ. конф. Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи*, Харків, Національна академія Національної гвардії України, 2022, с. 39-40.
- [5] В. М. Сенаторов, А. В. Гурнович, Б. О. Мельник, “Коліimatorний приціл для потреб Збройних Сил і Національної гвардії України”, на *Всеукраїнській наук.-практ. конф. Актуальні питання діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення*, Харків, Національна академія Національної гвардії України, 2023, с. 611-613.
- [6] JVC новини. (2008, Черв. 8). *JVC об'явила о создании 1,75" ЖК-матрицы с разрешением Super Hi-Vision* [Онлайн]. Режим доступу: [http://telephototech.ru>news\\_podr](http://telephototech.ru>news_podr).
- [7] В. М. Сенаторов, А. В. Гурнович, Б. О. Мельник та ін. «Застосування стрілецької зброї для знищення дрона-камікадзе «Шахед-136», *Наука і оборона*, №4, с. 41-47, 2023. DOI 10.33099/2618-1614-2023-23-4-41-47.

УДК 662.612:662,769.21

## РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЛАКОФАРБОВИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

*Когут В. М., Витвицька Л. А.*

*Івано-Франківський університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна*

*E-mail: [kogutvm@gmail.com](mailto:kogutvm@gmail.com), [l.vytvytska@gmail.com](mailto:l.vytvytska@gmail.com)*

Проблема захисту від корозії винятково актуальна в даний час, тому велика увага приділяється засобам захисту, значне місце серед яких посідають лакофарбові покриття [1].

Контроль якості лакофарбових матеріалів необхідно здійснювати при будь-яких технологічних процесах, адже від якості фарби, способу її нанесення та матеріалу поверхні, що фарбується, в значній мірі буде залежати довговічність антикорозійного покриття. На даний час кожен властивість фарби, тобто її колірність, ступінь забарвлення та в'язкість визначають окремим методом, що передбачає значну тривалість та громіздкість проведення контролю якості. Доцільно є розроблення методу комплексного контролю якості фарб.

Однією з основних властивостей фарб є їх здатність змочувати поверхню, від якої в першу чергу залежить стан та якість покриття, а значить і ступінь захисту. Змочуваність залежить від значень поверхневих натягів на границях розділів рідина-газ-тверде тіло. Однак, якщо поверхневий натяг на границі рідина-газ вимірюється з достатню високою точністю багатьма відомими методами (максимального тиску в газовому пухирці, витягування тіла, капілярного підняття), то поверхневий натяг твердого тіла на границі з газом і з рідиною виміряти є важко з високою точністю, оскільки стан поверхні твердого тіла залежить від його шорсткості, напруженого стану, наявності забруднення. Саме тому доцільно визначати якість покриття за змочуваністю даної твердої поверхні.

Контроль змочуваності різних рідин протягом багатьох десятиліть відбувався за допомогою різних оптичних систем. Достатньо висока точність оптичних приладів, реалізація принципу безконтактного контролю досліджуваних об'єктів визначають зростаючу роль оптичних систем в сучасних високих технологіях [2].

Визначення змочуваності поверхні в даному випадку проводиться шляхом вимірювання швидкості розтікання краплі фарби поверхнею оптичним методом за швидкістю збільшення площі плями. Однак оптичний метод не забезпечує необхідну динамічність процесу вимірювання і тому в якості покращення показників отриманого зображення використовуються фотоелектричні пристрої, що перетворюють отримане зображення в сигнали вимірювальної інформації, над якими здійснюється комп'ютерна обробка. Значні теоретичні і важливі практичні результати, досягнуті при використанні автоматизованих оптичних систем,

опубліковані в багатьох наукових статтях і ряді монографій, що присвячені методам оптичного дослідження. Необхідно відмітити, що розгляд сучасних оптичних систем необхідно вести з позиції інтердисциплінарності з застосуванням теоретичних положень загальної фізики, фізичної та квантової оптики, теорії оптико-електронних систем, теорії сигналів, комп'ютерної техніки. Тому пропонується комплексний метод контролю якості лакофарбових покриттів на основі сучасних інформаційно-вимірювальних технологій.

Оптичний метод найбільш доцільно розглянути на основі аналізу отримання зображення процесу розтікання фарби, яке здійснюється за допомогою лінійних давачів зображення (або послідовного ряду фотодіодів) та пристроїв перетворення зображення в електричні сигнали. Пучок світла, що випромінюється напівпровідниковим лазером значної потужності (потужність лазера залежить від вимог до стабільності роботи), фокусується об'єктивом на досліджуваному покритті. Світлова пляма на поверхні зазвичай має розмір від 1 до 2 мм., а у спеціальних випадках – від 0,2 до 4 мм. В залежності від якості поверхні досліджуваного об'єкту в зоні світлової плями проходить розсіяння світла, яке за допомогою світловіддільувальної пластинки (напівпрозоре дзеркало) направляється на давач зображення. Пропонується застосувати в якості оптоелектронного перетворювача напівпровідникову відеокамеру з високою роздільною здатністю. Це дасть змогу досить легко реалізувати ввід інформації у ЕОМ і її швидку обробку з метою усунення впливів різноманітних негативних факторів.

Таким чином, реалізацію запропонованого методу комплексного контролю якості лакофарбового покриття пропонується здійснювати пристроєм, який складається з таких блоків: оптичної системи, в яку входять об'єктив, світлорозділююча пластинка, лінза, відеокамера, лазер, система охолодження лазера, система контролю температури лазера, імпульсного блоку живлення і мережевого фільтра для забезпечення високо стабілізованої напруги живлення. Аналоговий вихід відеокамери приєднаний до відеовходу пристрою відеозахоплення ЕОМ. На основі даного пристрою забезпечується як контроль змочуваності конкретного лакофарбового покриття на конкретній досліджуваній поверхні, а також колірність і в'язкість покриття.

*Ключові слова:* лакофарбоаве покриття, контроль якості, змочуваність.

#### **Література**

- [1] ДСТУ ISO 12944-5:2015. Фарби і лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи.
- [2] Йосип Зілинський, “Класифікація методів крайового детектування зображень”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 161–169, 2017.

УДК 621.38:004

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

*Стрількова Т. О., Литюга О. П., Дуднік О. В.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

*E-mail: [tetiana.strilkova@nure.ua](mailto:tetiana.strilkova@nure.ua), [olena.dudnyk@nure.ua](mailto:olena.dudnyk@nure.ua)*

У сучасному світі системи відеоспостереження знаходять своє застосування у багатьох сферах людської діяльності. Використання тепловізійних та телевізійних систем при відеоспостереженні обумовлює можливість реєструвати та виявляти електромагнітне випромінювання оптичного діапазону, як від об'єктів, за якими ведеться спостереження, так й яке обумовлене фоновим випромінюванням з різноманітним рівнем енергії [1].

Застосування в системах відеоспостереження високочутливих датчиків оптичного випромінювання дозволяє виявляти та спостерігати окремі об'єкти, визначати їх просторові характеристики, розміри та напрямки руху. Також спостерігати за їх наявністю та станом при різноманітних умовах освітлення та застосування маскування об'єктів.

Метою роботи є розробка методів аналізу даних систем відеоспостереження при застосуванні стохастичних методів обробки сигналів з використанням елементів машинного навчання.

Стохастичні методи обробки сигналів використовуються для підвищення ефективності та точності систем відеоспостереження, особливо в умовах з високим рівнем шумів або невизначеності. До основних стохастичних методів аналізу даних для систем відеоспостереження можна віднести:

- метод Монте-Карло, який використовується для моделювання та імітації фізичних та математичних процесів, які впливають на процес розповсюдження, реєстрації та обробки сигналів. За допомогою цього методу можна оцінити розподіл ймовірностей вихідних сигналів з урахуванням випадкових вхідних сигналів.
- метод адаптивної фільтрації, який можна використати для автоматичного коригування параметрів сигналів відповідно до змін у статистиці вхідного сигналу.

Основою застосування стохастичних методів обробки вхідних та вихідних сигналів в системах відеоспостережень є обробка big data, що характеризує сигнали систем. Ці методи є основою розробки алгоритмів комплексування, покадрової та внутрішньокадрової обробки сигналів [2-4]. Застосування методів моделювання та обробки великих даних на основі Machine Learning для

електронних систем відеоспостереження є потужним інструментом розвитку та удосконалення систем.

В роботах [4,5] представлені моделі розповсюдження оптичного випромінювання в різноманітних середовищах. Особливу увагу приділяється аналізу особливостей часового та просторового розподілу фотонів. Нами в роботах [3-6] були представлені стохастичні моделі оптичного випромінювання з урахуванням статистичних властивостей та стійких законів розподілення.

В докладі обговорюються методи аналізу вихідного масиву даних систем відеоспостереження. Представлене імітаційне моделювання масиву даних систем відеоспостереження методом Монте-Карло з урахуванням характеристик об'єктів та умов спостереження. Для аналізу даних систем відеоспостереження використані методи Machine Learning та сформовані навчальні вибірки, які характеризують об'єкти та умови спостереження. Спираючись на стохастичний характер корисних та помилкових сигналів визначені імовірності характеристики навчальної вибірки. Представлені розрахунки характеристик виявлення корисних сигналів. Основну увагу приділено методам послідовного порівняння масиву даних, що надходить з системи відеоспостереження.

Запропонований метод аналізу даних дозволив фіксувати статистичні характеристики, які притаманні вихідним сигналам систем відеоспостереження. Метод включає урахування змін статистичних характеристик, розрахування імовірнісні характеристики виявлення та складає основу алгоритму прийняття рішення.

*Ключові слова:* моделювання оптичного сигналу, метод Монте-Карло, метод Machine Learning, дифузія фотонів, обробка сигналів, відеоспостереження.

#### **Література**

- [1] В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, та Є. Г. Белінський, *Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія*. Київ, Україна: «Вік прінт», 2017.
- [2] В. Г. Колобродов, та В. І. Микитенко, *Комплексування інформації в багатоканальних оптикоелектронних системах спостереження: монографія*. Київ, Україна: «Аверс», 2013.
- [3] О. В. Дудник, «Дослідження методів комплексування даних для систем відеоспостереження», на 28-й Між нар. молодіжний форум Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті, Харків, 2024 року, с. 23-24. DOI:10.30837/IYF.ELBE.2024.023.
- [4] T. A. Strelkova, A. P. Lytyuga, A. S. Kalmykov, “Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems”, *Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0.*, pp. 134-162, 2021. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005.
- [5] Т. Стрількова, “Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах”, дис. доктор., наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2017.
- [6] Т. О. Стрількова, О. П. Литюга, & О. С. Калмиков, “Реєстрація надслабкого випромінювання в оптико-електронних системах”, на XXI Міжнар. наук.-техн. конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 2022, Київ, с. 28.



УДК 621.384.3

## АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Танчук В. С., Колобродов В. Г.

Національний технічний університет України

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

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

### ВСТУП

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в сучасних реаліях показало високу ефективність та економічність. Постійне їх використання зі сторони агресора ставить під загрозу життя цивільних та військових. У зв'язку з цим з'являється необхідність у надійних системах виявлення БПЛА. Один зі способів виявлення БПЛА є використання тепловізійних систем, які мають низку переваг над камерами видимого діапазону. Проте головний недолік тепловізійних систем є мала кількість інформації про об'єкт спостереження. Для розв'язання цієї проблеми можна використати поляриметричні тепловізійні системи. Для перевірки доцільності використання поляриметричних тепловізійних систем необхідно провести їх порівняння зі класичними тепловізійними системами.

### ОГЛЯД ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

Поляриметричні тепловізори працюють на основі явища лінійної поляризації. Для формування поляриметричного зображення використовують вектор Стокса з відповідними його параметрами:

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_{90} \\ S_1 &= I_0 - I_{90} \\ S_2 &= I_{45} - I_{135} \end{aligned} \quad (1)$$

Щоб описати ступінь поляризації сцени, використовується ступінь лінійної поляризації (з англ. Degree of Linear Polarisation, або DoLP)

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

Існують 4 різні типи поляриметричних тепловізорів.

**Поділ амплітуди.** Амплітуда випромінювання потрапляючи на світло-розділювач, формує чотири зображення сцени дослідження, на чотирьох різних площинах. Кожна площина відповідає окремій орієнтації поляризації. Для формування поляриметричного зображення, зазвичай використовують чотири камери [1]. Очевидним є, що головним недоліком такої системи є її ціна, через те, що для формування зображення необхідно мати декілька тепловізійних камер. Також через це збільшується енергоспоживання, що робить таку систему не ефективною.

**Поділ апертурної діафрагми.** Випромінювання розділяється на чотири окремі канали у площині апертурної діафрагми. Кожен із каналів має свій поляризатор для вимірювання різного стану поляризації. Як результат, утворюються чотири поляриметричні зображення для кожного з кутів поляризації [2]. Дана система є дуже компактною та енергоефективною. Зображення для різних кутів поляризації утворюються одночасно, що робить таку систему швидкодіючою. Проте головним обмеженням такої архітектури є мале поле зору та роздільна здатність. Ціна та складність виготовлення такої системи є досить високою.

**Поділ фокальної площини.** Площина зображення ділиться на комірки. Розмір кожної такої комірки є  $2 \times 2$ . Кожен сегмент комірки відповідає певному куту поляризації. Така матриця розташовується близько до фокальної площини ФРА над пікселями матриці. Це дозволяє генерувати зображення для чотирьох різних кутів поляризації одночасно [3]. Дані системи є швидкими, енергоефективними, компактними та надійними. Головний недолік – ціна, через складний процес виготовлення таких матриць, бо ширина ґраток матриці складає близько 500 нм. Також в таких системах менша роздільна здатність, тому, що один піксель поляриметричного зображення складається з чотирьох пікселів комірки. Це вирішується більшим розміром ФРА, проте і ціна виросте відповідно.

**Поділ часу.** Поляризаційні зображення створюються послідовно, тобто з поділом часу, за допомогою поляризатора, який обертається та фазової пластинки (рис. 1). Також можливий варіант з обертовою фазовою пластинкою [4].

Дана архітектура є простою в реалізації та має низьку вартість. Головним недоліком такої системи є низька частота кадрів. Для того, щоб отримати одне поляриметричне зображення з тепловізора, необхідно отримати спочатку чотири зображення для кутів поляризації  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ . І тільки після цього ми зможемо розрахувати параметри Стокса та порахувати ступінь поляризації. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано наступний підхід. Можемо пришвидшити цей процес в 4 рази, якщо для знаходження DoLP використовувати попередньо зроблені зображення. Даний підхід наведений у табл. 1. Виділений у таблиці позначено момент, коли ми робимо зображення з певним кутом поляризації. Таким чином, за один повний оберт ми отримуємо чотири зображення ступеня поляризації замість одного. Згідно з формулою (2) зображення ступеня поляризації отримуємо за наступною формулою, де  $N$  – це  $\frac{1}{4}$  повного оберту поляризатора:

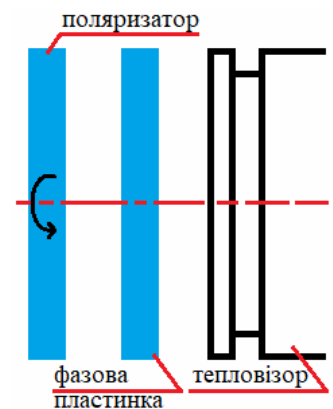


Рис. 1. Схема архітектури поляризаційного тепловізора поділу часу

$$DoLP_n = \frac{\sqrt{(I_0^{n+3} - I_{90}^{n+1})^2 + (I_{45}^n + I_{135}^{n+2})^2}}{I_0^{n+3} + I_{90}^{n+1}}, \quad (3)$$

$$n = N - 3, N > 3.$$

Таблиця 1. Опис методу оптимізації архітектури поділу часу

<i>N</i> - ¼ оберту	$I_0^N$	$I_{45}^N$	$I_{90}^N$	$I_{135}^N$	$DoLP_n$
1	$I_0^1$	-	-	-	-
2	$I_0^1$	$I_{45}^2$	-	-	-
3	$I_0^1$	$I_{45}^2$	$I_{90}^3$	-	-
4	$I_0^1$	$I_{45}^2$	$I_{90}^3$	$I_{135}^4$	$DoLP_1$
5	$I_0^5$	$I_{45}^2$	$I_{90}^3$	$I_{135}^4$	$DoLP_2$
6	$I_0^5$	$I_{45}^6$	$I_{90}^3$	$I_{135}^4$	$DoLP_3$
...					
N	$I_0^N$	$I_{45}^{N-3}$	$I_{90}^{N-2}$	$I_{135}^{N-1}$	$DoLP_{N-3}$

### ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ ІЗ КЛАСИЧНИМИ ТЕПЛОВІЗОРАМИ

Для проведення порівняльної характеристики поляризаційних тепловізорів зі звичайними було використано зображення з роботи [5], в якій проводилось дослідження можливостей поляриметричних тепловізорів для розрізнення БПЛА та птахів, ці зображення наведені на рис. 2.

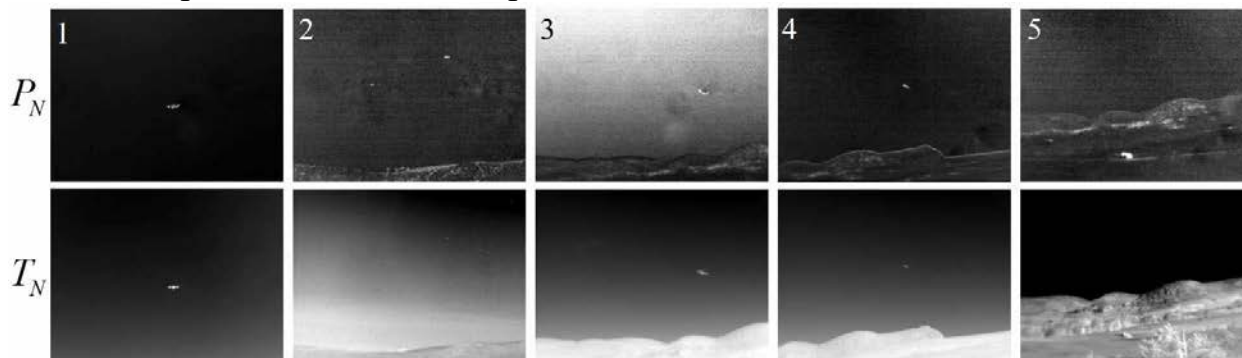


Рис. 2. Поляризаційні та звичайні зображення БПЛА з тепловізора: згори поляризаційні, внизу звичайні

Для порівняння використовував такі метрики як контрастність Вебера (4), загальна контрастність зображення (5), та ступень градієнту зображення (6).

Локальна контрастність Вебера, використовується коли необхідно порівняти яскравість дрібних елементів на великому однорідному фоні, тобто коли середня яскравість приблизно дорівнює яскравості фону.

$$C_w = \frac{I_o - I_b}{I_b}. \quad (4)$$

Середньоквадратична (RMS) контрастність визначається як середньоквадратичне відхилення інтенсивності пікселів.

$$C_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu)^2}. \quad (5)$$

Однією з основних метрик систем розпізнавання та виявлення є ступінь градієнта зображення. Використовуючи його, ми виділяємо контури та деталі об’єкта. Чим більше значення градієнта – тим більша різкість зображення.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

де

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x}, G_y = \frac{\partial I}{\partial y}. \quad (6)$$

Табл. 2. Результати порівняння

N	C <sub>w</sub>		C <sub>RMS</sub>		G	
	P <sub>N</sub>	T <sub>N</sub>	P <sub>N</sub>	T <sub>N</sub>	P <sub>N</sub>	T <sub>N</sub>
1	3,3665	0.8344	0.794	0.593	0.061	0.049
2	1.0545	0.3409	0.650	0.323	0.707	0.271
3	0.4586	0.0822	0.760	0.621	0.704	0.211
4	1.7232	0.5632	0.741	0.336	0.435	0.220
5	0.3185	-0.1746	0.767	0.506	0.829	0.324

Згідно з результатами дослідження видно, що поляриметричні зображення мають набагато вищі показники контрастності та ступеню градієнта. Це пов’язано з тим, що поляриметричні тепловізори більше придушують фон, через що об’єкти стають більш помітними. Це добре помітно на зображеннях 1, 2, 4, 5. Відповідну різницю видно і в результатах порівняння контрастності у табл. 2. Також, завдяки явищу поляризації, ми маємо більше деталей про об’єкт спостереження, ніж у звичайних тепловізорах. Цю різницю можна побачити у зображенні 3, 5 – значення градієнта набагато більше ніж у звичайного тепловізора. Тому можна дійти висновку, що поляриметричні тепловізори краще підходять для задач виявлення цілей.

### **ВИСНОВКИ**

Згідно з результатами порівняння, поляриметричні тепловізори мають значну перевагу для систем виявлення БПЛА. Проте їх складність та вартість сталять під питання резонність їх використання. Проте використовуючи метод для оптимізації кількості кадрів у поляриметричних системах на основі архітектури поділу часу, можна значно спростити такі системи та зменшити їх кінцеву вартість. В наступних дослідженнях необхідно провести порівняльну характеристику

ефективності моделей виявлення БПЛА на основі штучного інтелекту, використовуючи поляриметричні тепловізійні зображення.

*Ключові слова:* поляризація, тепловізор, контрастність, вектор Стокса.

#### **Література**

- [1] Kudenov, Michael W., J. Larry Pezzaniti, and Grant R. Gerhart. "Microbolometer-infrared imaging Stokes polarimeter." *Optical Engineering*, 48.6 (2009): 063201.
- [2] Pezzaniti, J. Larry, and David B. Chenault. "A division of aperture MWIR imaging polarimeter", *Polarization Science and Remote Sensing II*. vol. 5888, Spie, 2005.
- [3] Malone, Neil R., et al. "Detection comparisons between LWIR and MWIR polarimetric sensors." *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII*, vol. 6972, SPIE, 2008.
- [4] Gurton, Kristan P., and Melvin Felton, "Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging", *Optics express* 20.20, pp. 22344-22359, 2012.
- [5] Gurton, Kristan P., and US Army Research Laboratory Adelphi United States. "Calibrated Long-Wave Infrared (LWIR) Thermal and Polarimetric Imagery of Small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Birds." (2018): 0028.

UDC 681.7

## **ANALOG PHOTONIC INTEGRATED CIRCUIT FOR MATRIX TO VECTOR MULTIPLICATION**

*Iryna Avdieionok, Volodymyr Borovytsky*

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

### **Introduction**

The development of modern technology using nanostructures has led to the emergence of huge complex optical structures for creating photonic chips or integrating into more complex electronic circuits. Unlike their electronic counterparts, photonic integrated circuits use light waves instead of electrical signals to transmit information. Integration of optical circuits has the advantages of ultra-fast and broadband information processing at low power consumption, which provides new functionalities. All integrated devices are built on waveguides. Since waveguides are fundamental elements of integrated optics. The properties of optical waveguides have a certain influence on the characteristics of passive and active components.

### **Methods**

Modern optical integrated circuits use a new architecture for data processing using matrix computation. Such a device has a three-dimensional architecture with access to every data cell. For this, photocells and waveguides are used as switches between cells and signal summation. The top layer of waveguides is fed an input signal to each waveguide (Fig. 1) [1, 2]. With the help of perpendicular spatial placement of elements, vectors are multiplied. The result of the operation is read from the bottom layer of

waveguides. An additional layer with apertures can be used to adjust the matrix calculation between layers. Aperture layer that can be changed, a correction multiplication factor is introduced for the vector calculation.

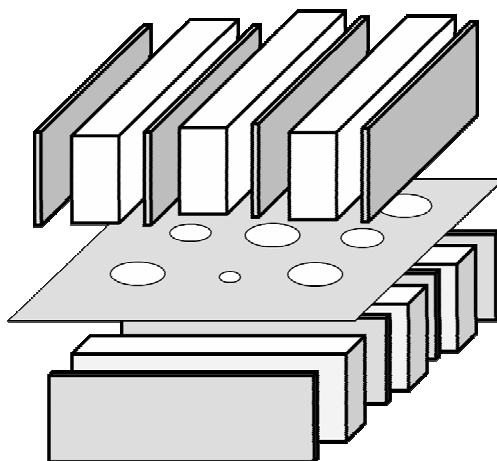


Fig. 1. PIC architecture for matrix calculations

Since the design uses rectangular waveguides without special properties, research is needed to identify better uniformity and brightness of the waveguide depending on the type of surface treatment of the waveguide.

In this study, we use 9 variants of waveguides. With 6, the waveguide has a matte material without additional surface treatment. Other waveguides have a transparent material, but with different surface finishes. 4 sample has a smooth surface without additional processing, 5 has a surface polished with a small grain, 1 – polished with a large grain. 2 the specimen has a polished surface with two small longitudinal grooves. 3 has a smooth surface with three transverse grooves. Samples 7-9 are rotated in such a way as to reduce the radiation area and improve the output parameters of the waveguide. Sample 7 has both surfaces without additional treatment. Another waveguide has a polished surface 8. In sample 9, both sides are polished.

To carry out the research, the waveguide is illuminated with LEDs from the ends. We photograph the illuminated waveguide. We evaluate the obtained material with the help of software. The generated program in Python extracts a line of data along the length of the waveguide in the middle of the frame. Based on the received information, it builds a graph of the uniformity of the waveguide illumination.

So, on the basis of the obtained graphs, we determine the worst uniformity in the matte waveguide. The best options for uniformity are obtained with 8-10 waveguides with variable spatial placement of the waveguide to reduce the area and improve the signal level. The highest signal level was obtained in waveguides with polished sides.

A study of the uniformity of the illumination of the waveguide depending on the type of surface treatment was carried out. The best uniformity was found when grinding

the surface of the waveguide. It can be seen from the constructed graphs that the main factor for improvement is spatial placement to reduce the area of interaction. By creating periodic ditches on the interaction surface, it will be possible to manage more complex mathematical functions of signal transmission, which will allow expanding the functionality of the system.

*Keywords:* photonic integrated circuit, optical waveguide, brightness distribution, brightness uniformity, image processing.

#### References

- [1] V. Borovytsky, & I. Avdeyonok, “Economical optical matrix to vector multiplier”, in *Proceedings SPIE 12938, 16th International Conference on Correlation Optics*, 129381F, 2023. Chernivtsi: Institute of physical, technical and computer sciences. DOI: 10.1117/12.3013064.
- [2] V. Borovytsky, I. Avdieionok, S. Tuzhanskyi, & H. Lysenko, “Photonic integrated circuits for optical matrix-vector multiplication”, *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 43(1), pp. 11-18, 2022. DOI: 10.31649/1681-7893-2022-43-1-11-18.

УДК 004.94 621.32 628.9

## НАБЛИЖЕННЯ ФОРМУЛИ ПЛАНКА В КОМП’ЮТЕРНИХ МОДЕЛЯХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

*Кравченко І. В.*

*Національний технічний університет України*

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

*E-mail: [Kravchenko.Igor@lil.kpi.ua](mailto:Kravchenko.Igor@lil.kpi.ua)*

Для розрахунку всіх типів температурних випромінювачів базовою є формула Планка, яка визначає спектральну світність випромінення абсолютно чорного тіла (АЧТ) з температурою  $T$  для визначеної довжини хвилі  $\lambda$ .

В значній кількості моделей [1-3] включно з нормативами Національного бюро стандартизації США для опису випромінення ламп розжарювання замість формули Планка використовується вираз Віна. При цьому зазначається помилка моделей менша за 0.5%.

Досліджено вплив заміни формули Планка наближенням Віна для сірих теплових джерел та оптичних ламп розжарювання з урахуванням коефіцієнта випромінення тіла розжарювання  $\epsilon_w(T, \lambda)$ , коефіцієнта форми  $\epsilon_G(T)$ , та коефіцієнта пропускання кварцового скла колби лампи  $\tau(T, \lambda)$ . за критерієм середньої відносної похибки в ультрафіолетовому (УФ, 0.26 мкм - 0.4 мкм), видимому (0.4 мкм – 0.75 мкм), ближньому інфрачервоному (NIR, IR-A, 0.75 мкм – 1.4 мкм) та середньому інфрачервоному (SWIR, IR-B, 1.4 мкм – 2.7 мкм) діапазонах.

Результати розрахунків наведено для сірих випромінювачів на рис. 1, а, для ламп розжарювання – на рис. 1, б.

Проведені розрахунки для стандартизованих випромінювачів з колірними температурами 2300 К, 2856 К, 3000 К, 3200 К, 6000 К.

Показано, що для всіх типів випромінювачів заміна з відносною похибкою  $\delta < 0.01$  можлива тільки для ультрафіолетового та видимого діапазонів.

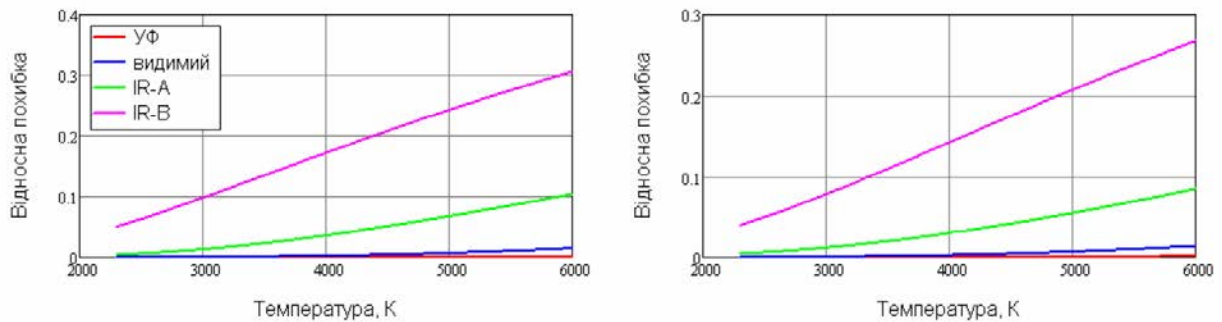


Рис. 1. Відносна похибка заміни: а – для сірих випромінювачів; б – для ламп розжарювання

Для ближнього інфрачервоного діапазону NIR (IR-A) відносна похибка заміни становить для температур 2300 К, 2856 К, 3000 К, 3200 К, 6000 К відповідно:

- сірі випромінювачі – 0.4 %, 1.1 %, 1.3 %, 1.7 %, 10.8 %;
- лампи – 0.4 %, 1.0 %, 1.2 %, 1.5 %, 9.2 %.

Для середнього інфрачервоного діапазону SWIR (IR-B) відносна похибка заміни становить для температур 2300 К, 2856 К, 3000 К, 3200 К, 6000 К відповідно:

- сірі випромінювачі – 0.5 %, 8.7 %, 9.8 %, 11.2 %, 30.6 %;
- лампи – 3.9 %, 6.9 %, 7.8 %, 9.0 %, 27.0 %.

Зроблені висновки, що заміна виразу Планка на наближення Віна в розрахункових моделях систем для інфрачервоного діапазону IR-A з використанням високотемпературних випромінювачів не забезпечує задовільної точності, а для діапазону IR-B взагалі не може вважатися доречною для будь-яких температурних джерел.

**Ключові слова:** лампа розжарювання, формула Віна, NIR, SWIR, IR-A, IR-B, комп'ютерна модель.

#### **Література**

- [1] J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson and D. A. McSparron, «NBS measurement services: spectral irradiance calibrations», *National Bureau of Standards Special Publication 250-20*, 1987. – 120 p.
- [2] G. Andor, «Approximation function of spectral irradiance of standard lamps», *Metrologia*, vol. 35, №4, pp. 427-429, 1998.
- [3] R. Neupane, «Study on the Validity of Wien's Displacement Law on Tungsten Bulb», *Journal of Nepal Physical Society Volume*, vol. 6, Is. 2, December 2020, pp. 85-96.



UDC 681.7.067.22

## WIDE-ANGLE LENS FOR MODERN 4G+ IMAGE INTENSIFIER TUBES

<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>Optical and mechanical college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

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

The modern 4G+ image intensifier tubes can deliver high performance to end-users of modern warfare. They ensure both high Figure Of Merit (FOM) and extended sensitivity. To operate properly, such intensifier tubes require fast and high-quality optical components.

In this research, a multi-lens wide-angle objective lens is presented for use with modern 4G+ image intensifier tubes. The optical system was generated in the automatic mode with the help of the optical design software PODIL by applying a modified modern evolution algorithm. A schematic optical diagram of the designed 15.5-mm F/1.4 lens is shown in Fig.1. The lens is intended to operate within the spectral range of 0.45 to 0.9 micrometers with photocathodes up to 18 mm in diameter.

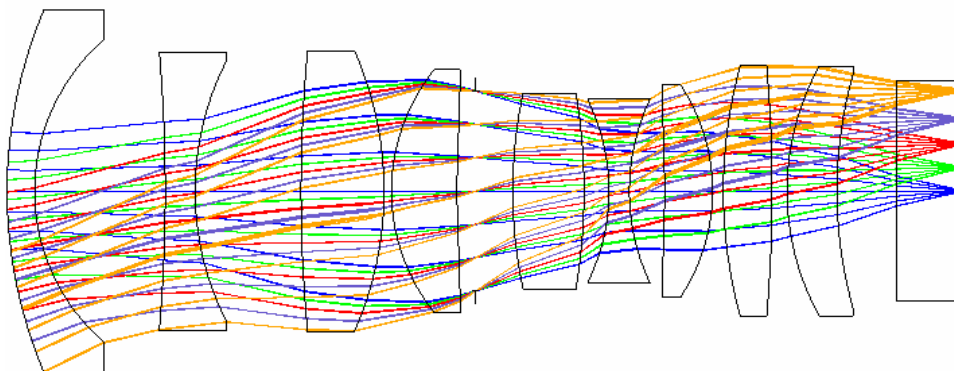


Fig. 1. Schematic optical diagram of the developed 15.5-mm F/1.4 lens having the angular field of view of 60 degrees

The considered optical system contains 9 spherical lenses. It provides the effective focal length of 15.5 mm and the entrance pupil diameter of 11.15 mm. The angular field of view is 60°, and the image circle diameter is 17.9 mm. The total track (i.e., the axial distance from the front lens surface to the image plane) is approximately 80 mm. The maximum relative distortion of the system is 2%. Fig. 2 and 3 illustrate enclosed energy diagrams and polychromatic diffraction modulation transfer function charts evaluated for different field points.

The report presents the results of developing a wide-angle lens for modern 4G+ image intensifiers. It may be interesting for designers developing similar devices.

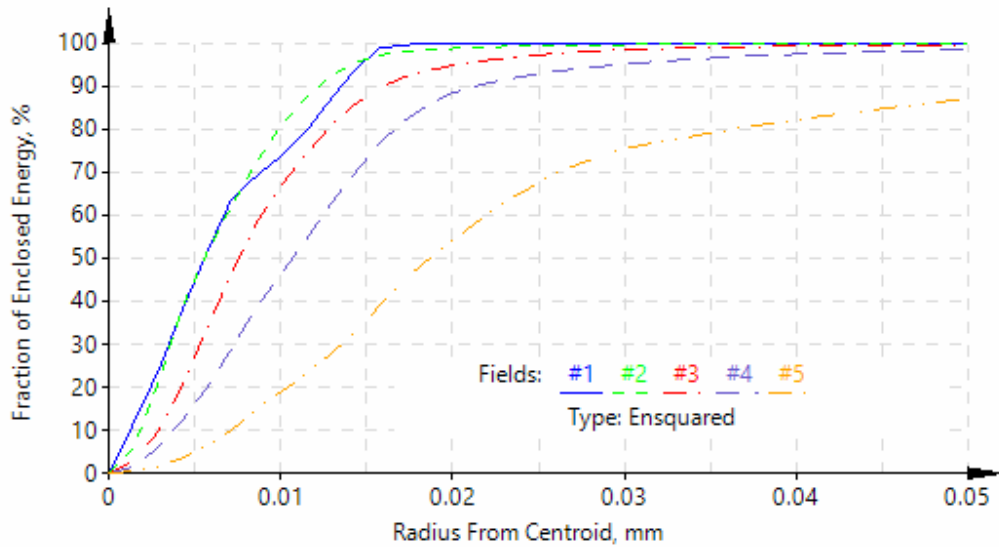


Fig. 2. Enclosed energy diagrams of the developed 15.5-mm F/1.4 lens: field numbers #1 to #5 correspond to field angles 0°, 7.5°, 15°, 22.5, and 30°, respectively

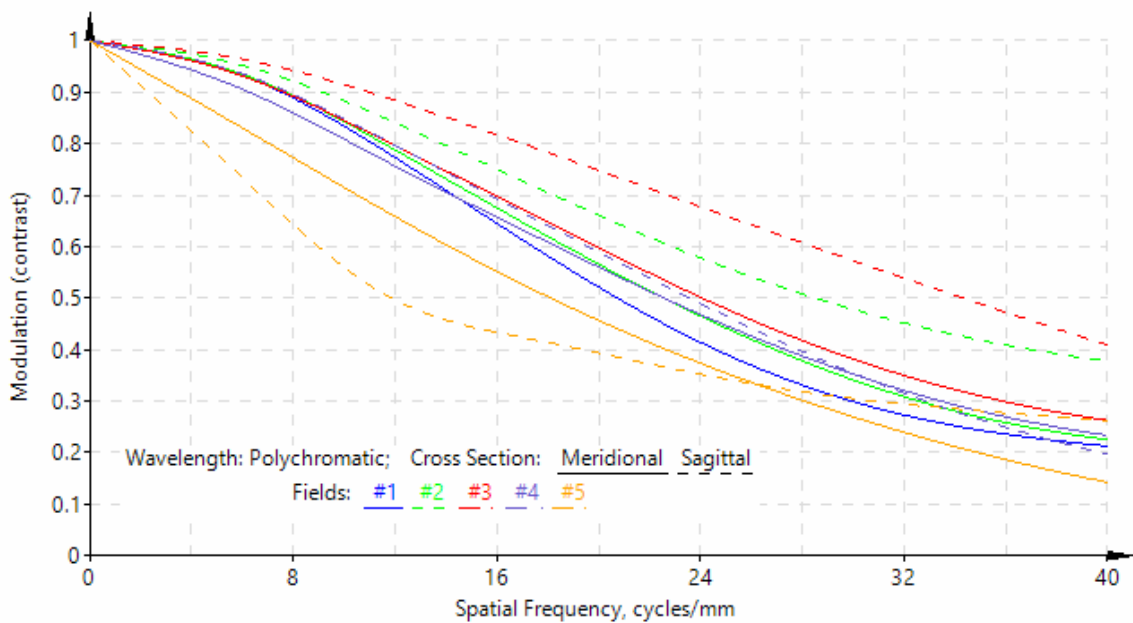


Fig. 3. Polychromatic diffraction MTFs of the developed 15.5-mm F/1.4 lens: field numbers #1 to #5 correspond to field angles 0°, 7.5°, 15°, 22.5, and 30°, respectively

*Keywords:* night vision, image intensifier tube, 4G+, lens, distortion, modulation transfer function.

UDC 681.7.067.5

## PROJECTION LENS FOR DIGITAL NIGHT VISION DEVICES

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

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

<sup>2)</sup>*Optical and mechanical college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

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

Due to the microchannel plate (MCP) technology, the advanced 4G+ image intensifier tubes can provide an improved contrast and high resolution (up to 76 lp/mm). Night-time scenes can appear more natural in black-and-white (gray scale) versus the usual green. Therefore, for example, Photonis offers night vision with white phosphor (P45, Onyx).

In this research, a multi-lens projection lens operating in the visible spectrum (from 0.47 to 0.65 micrometers) is developed. Its optical system is well-corrected on monochromatic and chromatic aberrations. This lens is intended to be used in digital night vision devices containing 4G+ image intensifier tubes with white phosphor curved exit surfaces. The presented optical system was automatically generated by a modified modern evolution algorithm implemented in the proprietary optical design software PODIL.

The developed optical system contains 7 spherical lenses. The projection lens provides the lateral magnification of  $-0.32\times$  and the object space numeric aperture of 0.1. The 19-mm linear field of view is curved with a radius of 18 mm. The effective focal length of the lens is equal to 14.4 mm, and the F-number is 1.11.

Fig.1 illustrates a schematic optical diagram of the developed projection lens.

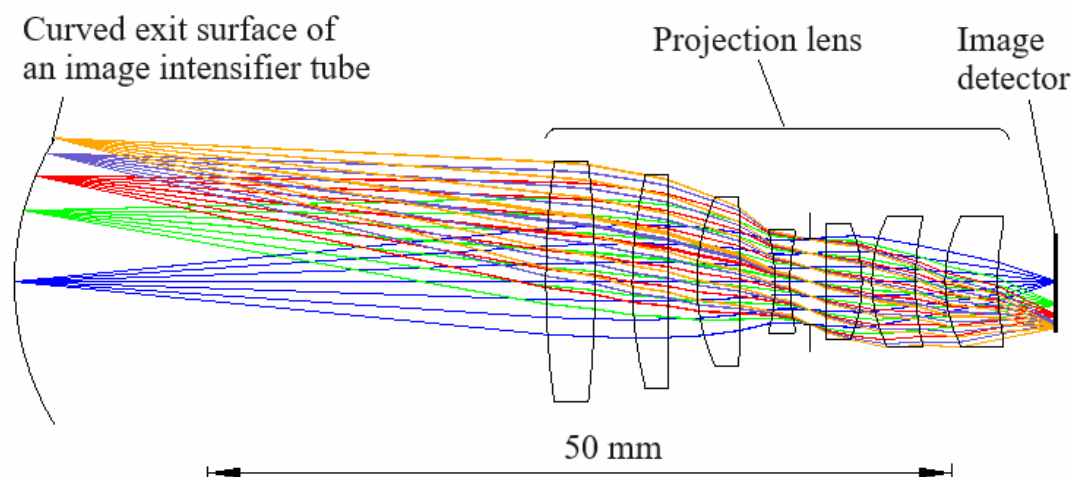


Fig. 1. Schematic optical diagram of the developed projection lens to be used in digital night vision devices

The considered optical system delivers high image quality. The maximum relative distortion of the system does not exceed 2%. Fig. 2 and 3 display standard spot diagrams and polychromatic diffraction MTF charts evaluated for different field points.

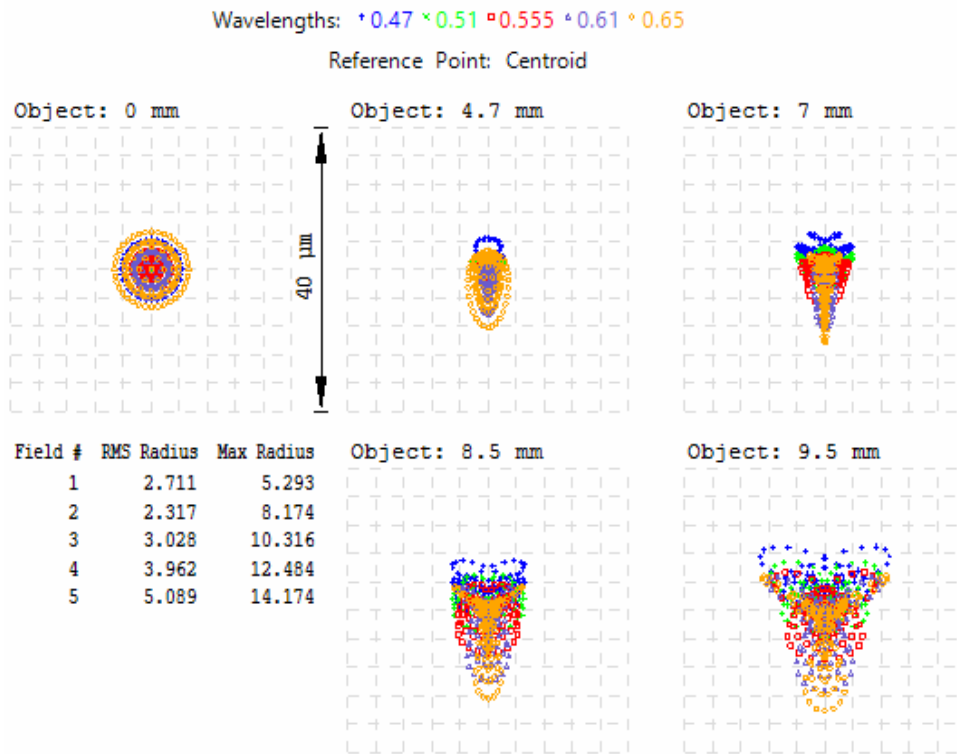


Fig. 2. Spot diagrams of the developed projection lens

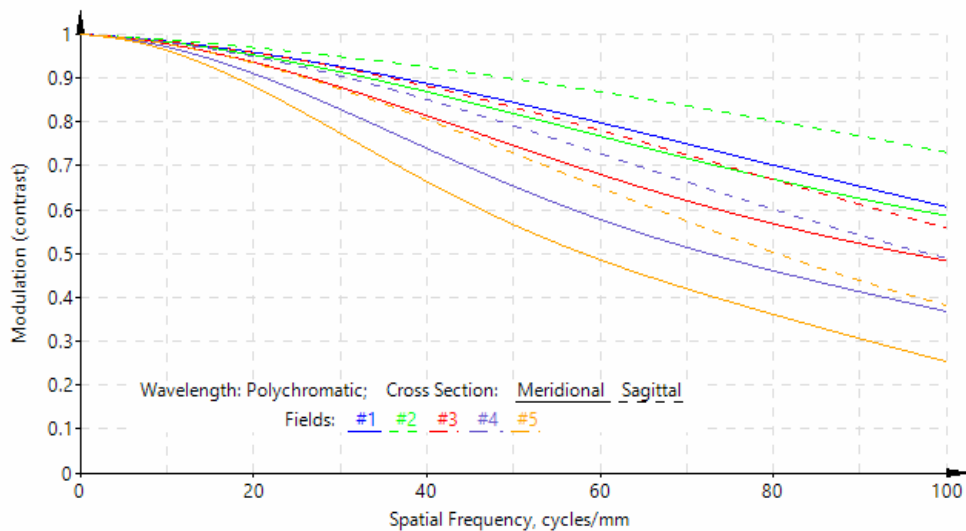


Fig. 3. Polychromatic diffraction MTFs of the developed projection lens: field numbers #1 to #5 correspond to field angles 0, 4.7, 7, 8.5, and 9.5 mm, respectively

This report may be useful for engineers developing night vision devices. It contains detailed information about the developed projection lens.

*Keywords:* night vision, image intensifier tube, Onyx, projection lens, MTF, distortion.

УДК 681.7

## ЗУМ-АФОКАЛЬНА СИСТЕМА ЗА СХЕМОЮ КЕПЛЕРА

Чиж І. Г.

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)

Розвиток адаптивної оптики призвів до появи нових оптичних елементів – варіо-лінз з швидкою і автоматизованою зміною їх оптичної сили в широкому діапазоні діоптрій. На ринку представлені варіо-лінзи, в яких для зміни оптичної сили використовується ефект керованої електро-змочуваності [1]. Їх світловий діаметр досягає 4.4 мм, а загальний діапазон зміни оптичної сили складає  $\pm 20$  діоптрій. На ринку існують також варіо-лінзи іншого типу з еластичною мембраною, що розділяє дві рідини з різними показниками заломлення. Форма мембрани є керованою механічним тиском. Світловий діаметр цих лінз досягає 20 мм, а діапазон зміни оптичної сили  $\pm 18$  діоптрій [2]. Швидкодія і компактність таких лінз, а також можливість їх нерухомості в системах спонукала їх широке застосування в машинному зорі, мікроскопії, офтальмології, в спостережній оптиці безпілотних літальних апаратів, в наукових дослідженнях та інше. Використання варіо-лінз в класичних типах оптичних систем потребує теоретичної бази, яка дозволяє здійснювати структурний та параметричний синтез систем з потрібними функціональними параметрами. В цій роботі, через обмежений обсяг, розглядається лише один тип таких систем, а саме зум-афокальних, в яких закладається структура телескопічних систем за схемою Кеплера, що складена з нерухомих варіо-лінз. На рис.1 в тонких компонентах показана така система.

Згідно з рис. 1

$$f'_{1\text{var}} - f'_{2\text{var}} = f'_{1\text{var}} + f'_{2\text{var}} = L, \quad (1)$$

$$\frac{f'_{1\text{var}}}{f'_{2\text{var}}} = -\gamma. \quad (2)$$

Із системи рівнянь (1), (2):

$$f'_{1\text{var}}(\gamma) = \frac{\gamma}{\gamma-1} L, \quad (3)$$

$$f'_{2\text{var}}(\gamma) = \frac{1}{1-\gamma}L. \quad (4)$$

Оптичні сили варіо-лінз в діоптріях:

$$\Phi_{1\text{var}}(\gamma)[\text{dptr}] = \frac{1000(\gamma-1)}{\gamma L}, \quad (5)$$

$$\Phi_{2\text{var}}(\gamma)[\text{dptr}] = \frac{1000(1-\gamma)}{L}. \quad (6)$$

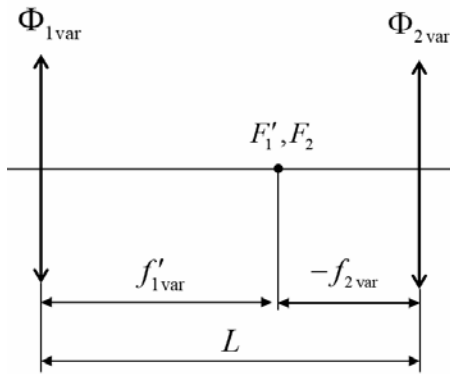


Рис. 1. Зум-афокальна система за схемою Кеплера

В формулах (3) – (6) кутове збільшення  $\gamma$  має від’ємний знак, оскільки система Кеплера формує перевернуте зображення.

На рис. 2 показано графіки функцій  $\Phi_{1\text{var}}(\gamma)[\text{dptr}]$  і  $\Phi_{2\text{var}}(\gamma)[\text{dptr}]$ , адаптовані під параметри варіо-лінзи Optotune ML-20-37, яка має найбільший діапазон зміни оптичної сили та найбільший світловий діаметр.

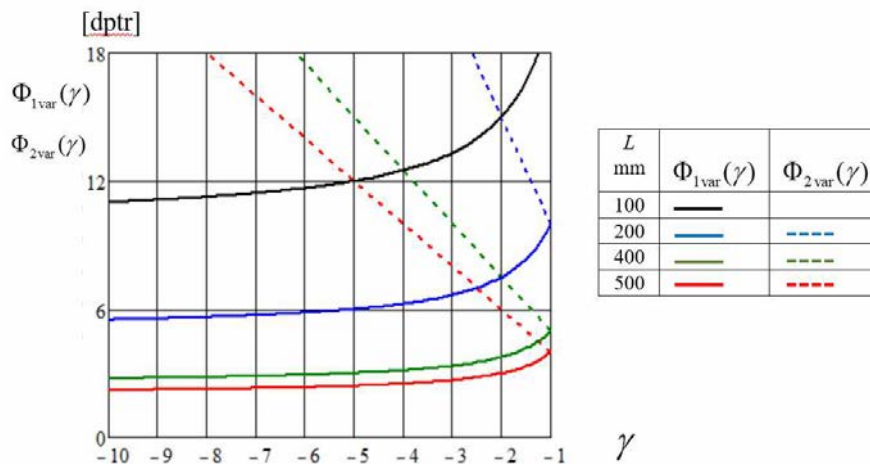


Рис. 2. Графіки залежності оптичних сил варіо-лінз від кутового збільшення  $\gamma$

З наведених графіків випливає, що можливий діапазон значень кутового збільшення  $\gamma$  істотно обмежується як діапазоном оптичної сили другої варіо-лінзи, так і осьовою довжиною оптичної системи. Це зумовлено тим, що в системі Кеплера на відміну від системи Галілея обидва компоненти мають позитивну оптичну силу. Тому діапазон кутового збільшення системи Кеплера обмежується максимальним значенням оптичної сили другого компонента.

Стосовно варіо-лінзи Optotune ML-20-37, у якій, навіть для отримання кутового збільшення  $\gamma = -1$  згідно з формулою (6) потрібна осьова довжина

системи не менше 111.11 мм. За заданої довжини  $L$  з формули (6) можна визначити максимально можливе збільшення системи Кеплера

$$\gamma_{\text{lim}} = 1 - \frac{L(\Phi_{2\text{var}})_{\text{max}}}{1000}, \quad (7)$$

де  $(\Phi_{2\text{var}})_{\text{max}}$  найбільше в діоптріях значення оптичної сили другої варіо-лінзи. Формула (7) вказує на те, що при фіксованому значенні максимальної оптичної сили другої варіо-лінзи зростання значення  $|\gamma_{\text{lim}}|$  можливе лише при збільшенні довжини системи  $L$ . Наведене також свідчить про те, що за однакової осьової довжини систем Галілея і системи Кеплера остання має менші межі забезпечення потрібних значень  $\gamma$ .

У тих випадках, коли через габаритні обмеження осьової довжини система Кеплера не забезпечує потрібного діапазону значень  $\gamma$ , то розширення цього діапазону значень можна досягти за рахунок встановлення поблизу другої варіо-лінзи додаткової лінзи з фіксованим значенням оптичної сили  $\Phi_{\text{fix}}$ . Такий спосіб може також виявитися раціональним для компенсації аберацій варіо-лінзи. При цьому сумарна оптична сила подвійного компонента

$$\Phi_{\Sigma\text{var}}(\gamma) = \Phi_{\text{fix}} + \Phi_{2\text{var}}(\gamma) - d \cdot \Phi_{\text{fix}} \cdot \Phi_{2\text{var}}(\gamma), \quad (8)$$

де  $d$  - відстань між задньою головною точкою фікс-лінзи і передньою головною точкою варіо-лінзи. Оскільки передня головна точка варіо-лінзи завжди перебуває всередині лінзи, то спеціальною формою фікс-лінзи її задню головну точку можна винести за її межі та поєднати з передньою головною точкою варіо-лінзи, забезпечивши при цьому умову  $d = 0$ . При цьому

$$\Phi_{\Sigma\text{var}}(\gamma) = \Phi_{\text{fix}} + \Phi_{\text{var}}(\gamma). \quad (9)$$

У такий спосіб за потреби можна зміщувати діапазон варіацій оптичної сили варіо-лінз.

У традиційній афокальній системі за схемою Кеплера її поле зору обмежується польовою діафрагмою, що розташована в площині суміщених фокусів  $F_1'F_2$ , рис. 1. При змінах оптичних сил компонентів вказані точки зміщуються вздовж оптичної осі. Це потребувало б переміщення вздовж осі польової діафрагми, можливо змінюючи при цьому її діаметр. Але це суперечить вихідній умові дотримання нерухомості в системі всіх її компонентів. З цього випливає, що наявність польової діафрагми в зум-афокальній системі за схемою Кеплера з нерухомими компонентами неможлива. У такому разі поле зору може обмежуватися віньєтною діафрагмою.

Якщо зум-афокальна система складена з варіо-лінз, у яких задня за ходом променів лінза має світловий діаметр не менший за світловий діаметр передньої

лінзи, до того ж зум-афокальна система працює в режимі  $|\gamma| \geq 1$ , то тоді оправа передньої лінзи слугує апертурною діафрагмою, а оправа задньої лінзи - він'єтною. У цьому випадку розмір поля зору визначається з урахуванням значення коефіцієнта він'єтування  $k$ .

Формула (10) вказує кут поля зору в просторі предметів, з якого промені, що повністю заповнюють отвір першої лінзи, не він'єтуються. Формула (11) дає розміри кута поля зору, за межами якого жоден промінь пучка, що заповнює отвір першої лінзи, через отвір другої лінзи не проходить.

$$2\omega_{k=1} = 2\arctg \left[ 0.5 \left( \frac{\varnothing_1 + \varnothing_2}{L} - \frac{\varnothing_1}{f'_{1\text{var}}} \right) \right] \quad (10). \quad 2\omega_{k=0} = 2\arctg \left[ 0.5 \left( \frac{\varnothing_2 - \varnothing_1}{L} + \frac{\varnothing_1}{f'_{1\text{var}}} \right) \right] \quad (11)$$

Згідно з виразом (7) довжина системи  $L = (1 - \gamma_{\text{lim}})f'_{2\text{min}}$ , де  $\gamma_{\text{lim}}$  - граничне значення кутового збільшення,  $f'_{2\text{min}}$  - граничне мінімальне значення задньої фокусної відстань другої варіо-лінзи. При підстановці цього виразу в (10), (11) отримуємо залежності кутового розміру поля зору системи від граничного значення кутового збільшення:

$$2\omega_{k=1} = 2\arctg \left\{ \frac{1}{2f'_{2\text{min}}} \left[ \frac{\varnothing_2 \gamma_{\text{lim}} + \varnothing_1}{(1 - \gamma_{\text{lim}}) \gamma_{\text{lim}}} \right] \right\}, \quad 2\omega_{k=0} = 2\arctg \left\{ \frac{1}{2f'_{2\text{min}}} \left[ \frac{\varnothing_2 \gamma_{\text{lim}} - \varnothing_1}{(1 - \gamma_{\text{lim}}) \gamma_{\text{lim}}} \right] \right\}.$$

На рис. 3 показано графіки, отримані за цими формулами. Для прикладу знову взято варіо-лінзу Optotune ML-20-37, у якої світловий діаметр 20 мм і мінімальне значення фокусної відстані  $f'_{2\text{min}} = 55.5$  мм, а також  $\varnothing_1 = \varnothing_2 = 20$  мм.

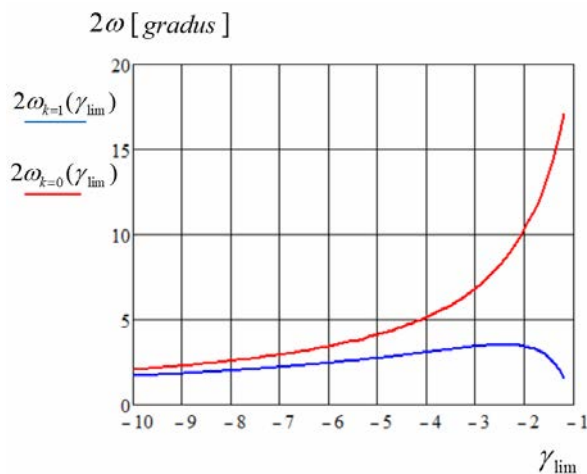


Рис. 3. Залежності розмірів поля зору від кутового збільшення  $\gamma_{\text{lim}}$

Представлені на рис. 3 графіки показують, що в міру зростання абсолютного значення кутового збільшення розміри поля зору зменшуються, що зумовлено зростанням осевої довжини системи за постійних світлових діаметрів варіо-лінз. До того ж розміри поля зору без він'єтування променів і з повним він'єтуванням променів асимптотично зближуються.

*Ключові слова:* зум-афокальна система Кеплера, варіо-лінзи, оптична сила варіо-лінз.

**Література**

- [1] [https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/Pic6/00102049\\_0.pdf](https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/Pic6/00102049_0.pdf)
- [2] <https://www.optotune.com/focus-tunable-lenses>



UDC 621.382

## ELECTRO-OPTICAL ANTIPERSONNEL MINES DETECTION

*Mykytenko V. I.*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

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

One of the most urgent tasks in Ukraine's post-war recovery is landmine clearance. The complexity of this task lies in the vast scale of both mined areas and the quantity of explosives present on them. A clear requirement for mine clearance organization is the high productivity of all subsystems involved in the process. Currently, electromagnetic induction-based systems remain the primary means of demining [1]. However, as practice shows [2], such detection methods result in a very high probability of false alarms and require significant time. Among other antipersonnel mines detection technologies, there is considerable interest in the use of electro-optical devices [1]. The aim of this work is to justify the technology of mine detection over large areas using electro-optical means.

Given the specifics of the propagation of electromagnetic waves in the optical range, only surface-laid mines are considered. Mines buried in the ground can sometimes be detected using thermal imaging methods or by combining vibro-acoustic methods with laser Doppler measurements [3, 4]. However, these methods do not provide sufficient productivity.

The first question is the type of platform on which the equipment will be placed. The answer to this has already been found. When detecting small ground objects, it is obvious that the sighting axis of the electro-optical system (EOS) needs to be positioned vertically or at a slight angle to the underlying surface. For this purpose, for example, remote rods can be used, which are installed on vehicles, including ground-based robotic complexes [5]. Additionally, mines can be immediately neutralized using an additional manipulator. However, the productivity of this method is insufficient. The best solution for surveying large areas is to place EOS on board unmanned aerial vehicles. In this case, the use of artificial intelligence enables the automation of the mine detection process, resulting in the creation of a minefield map.

The second question is much more complicated - what indicator of the presence of mines in a specific area is most relevant? In fact, every parameter of electromagnetic waves can contain such an indicator. Accordingly, the following are considered:

- Spatial characteristics (shape, size), as well as their changes over time in active mode of the detection system's operation;
- Spectral characteristics of reflected and self-emitted radiation in both broad and narrow subranges;
- Polarization of reflected and self-emitted radiation;

- Fluorescence.

Each of the mentioned parameters can be measured in both active and passive modes of operation. Unfortunately, numerous studies show that none of the single-parameter electromagnetic radiation assessment technologies are sufficiently satisfactory in practice. Modern mine detection EOS are multiparametric and utilize several technologies [6]. The final decision on the presence of an object in the field of view is made based on information fusion from multiple channels [7].

However, even a multichannel EOS-based system does not yet provide sufficient probability of correctly detecting all mines in a given area of land. This is due to the dependence of optical characteristics of the background/target environment on external illumination, season, time of day, weather conditions, and viewing angles. Increasing the efficiency of the detection system is possible by incorporating additional non-optical information channels, as well as contextual information (geographical features of the surveyed area, history of combat operations, etc.). Such a measurement complex will obviously be bulky and consume significant electrical power. Its placement on an unmanned aerial vehicle will pose significant challenges. Hence arises the third question: which of the existing electro-optical observation technologies should be primarily used to address the stated task?

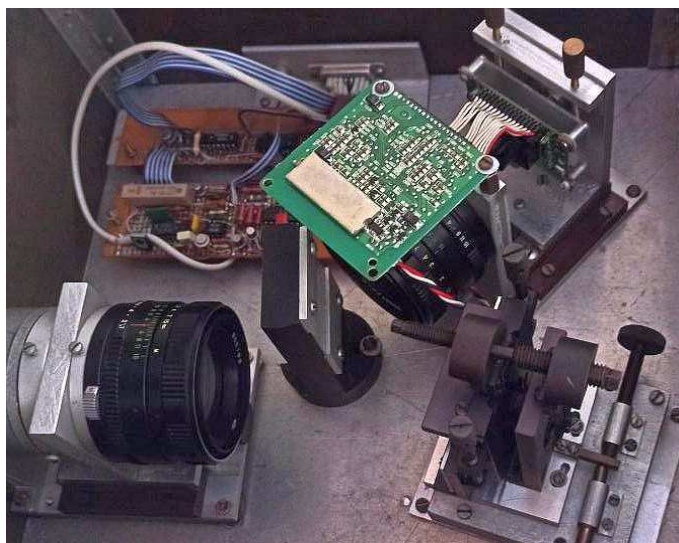


Fig. 1. Laboratory layout of a 64-channel video spectrometer

Field measurements indicate that video spectrometers provide the most comprehensive description of relevant indicators of artificial objects on natural backgrounds [1, 8]. One of the simplest and most affordable options for such an EOS is a system based on a diffraction grating operating in the visible spectrum. A prototype of such an EOS (see figure) demonstrated the ability to analyze the spectral composition of the background/target scene with sufficient spectral resolution for mine detection.

Currently, a prototype of a compact onboard EOS with 128 spectral channels in the range of  $\lambda=0.4-0.9 \mu\text{m}$  is being developed. It is planned that signal processing will be the next issue to be addressed in the project [9]. Based on the experimental results, it will be possible to optimize the design of the EOS input block considering the characteristics of the unmanned aerial vehicle.

**Keywords:** optoelectronic sensors, automatic observation, landmine detection, surface antipersonnel landmines, image processing.

#### **References**

- [1] Gibson, Jacqueline MacDonald and J. R. Lockwood, *Alternatives for Landmine Detection*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2003.
- [2] Y. Das, J.T. Dean, D. Lewis, J.H.J. Rosenboom, and G. Zahaczewsky, A multinational technical evaluation of performance of commercial off the shelf metal detectors in the context of humanitarian demining (Ispra: European Commission Joint Research Center), 2001.
- [3] A. Linderhed, S. Sjökvist, S. Nyberg, M. Uppsäll, “Land mine detection by IR temporal analysis: detection method”, *Proc. SPIE*, vol. 5794, Detection and remediation technologies for mines and minelike targets X, pp. 21-29, 2005.
- [4] R. W. Haupt and K. D. Rolt, “Standoff acoustic laser technique to locate buried land mines”, *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 15, no. 1, 2005.
- [5] В. І. Микитенко, В. М. Сенаторов, О. Д. Мельник, *Оптичні системи наземних роботизованих комплексів. Монографія*. Київ, Україна: Інтерсервіс, 2023.
- [6] Dietmar Letalick, Ingmar Renhorn, and Ove Steinvall Multi-optical mine detection system (MOMS) – Final report FOI-R--2902—SE, FOI, Swedish Defence Research Agency, 58 p., 2009.
- [7] V. Mykytenko, “Electro-Optical Surveillance Systems for Unmanned Ground Vehicle”, in *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, M. Bezuglyi, N. Bouraou, V. Mykytenko, G. Tymchuk, A. Zaporozhets (eds), vol. 511. Springer, Cham. 2024, pp. 49–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_2)
- [8] В. Г. Колобродов, П. В. Бородийчук, В. И. Микитенко, “Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли”, *Космична наука і технологія*, т. 4, № 1, с. 29-38, 1998.
- [9] E. Vivoli, M. Bertini, L. Capineri, “Deep Learning-Based Real-Time Detection of Surface Landmines Using Optical Imaging”, *Remote Sens.* 2024, 16, 677. <https://doi.org/10.3390/rs16040677>