

СОКУРЕНКО ВЯЧЕСЛАВ

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0001-5057-182X>  
e-mail: [sokurenko2@meta.ua](mailto:sokurenko2@meta.ua)

ЛАВРЕНЮК ДАРИНА

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
e-mail: [dana.lavreniuk@gmail.com](mailto:dana.lavreniuk@gmail.com)

## АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЛІНЗОВИХ ОБ'ЄКТИВІВ ДЛЯ КОРОТКОХВИЛЬОВОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

В даному дослідженні виконано перевірку результативності процедури автоматизованого параметричного синтезу нових оптичних систем багатолінзових об'єктивів, в основу якої покладений модифікований алгоритм стохастичної глобальної оптимізації. Зокрема, в роботі здійснений автоматизований абераційний синтез двох оптичних систем сферичних об'єктивів: 8-лінзового об'єктива з фокусною відстанню 50 мм, відносним отвором 1:1,4 і кутовим полем зору 23° та 6-лінзовий об'єктива з фокусною відстанню 200 мм, відносним отвором 1:2,4 і кутовим полем зору 5,87°. Обидва об'єктиви призначені для функціонування в ближньохвильовому інфрачервоному діапазоні (short-wave infrared, SWIR, 0,9–2,3 мкм) з матричними приймачами випромінювання, що мають діагональ до 20,5 мм. Для синтезованих систем значення дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій виявилися більшими, ніж у розглянутих комерційних зразках. Виконаний абераційний аналіз синтезованих SWIR-об'єктивів та порівняння їх характеристик з комерційними аналогами вказують на високу якість зображення та конкурентоздатність отриманих зразків.

**Ключові слова:** об'єктив, короткохвильовий інфрачервоний діапазон, short-wave infrared (SWIR), автоматизоване проєктування, глобальна оптимізація, модуляційна передавальна функція (МПФ), дисторсія.

SOKURENKO VYACHESLAV  
LAVRENUK DARYNA

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

### AUTOMATED DESIGN OF OPTICAL SYSTEMS OF LENSES FOR SHORT-WAVE INFRARED RANGE

Cameras operating in short-wave infrared range (SWIR) are increasingly appearing in fields ranging from agriculture, food processing, and medical imaging to quality control, security/surveillance, automotive, and even archeology and art. Advanced SWIR cameras require SWIR lenses well-corrected for monochromatic and chromatic aberrations, with small F-numbers and high values of modulation transfer functions (MTF). In this research, a process of automated design of lens optical systems with a fixed focal length and high image quality for short-wave infrared range has been experimentally investigated. In particular, an automated aberration synthesis of two optical systems of SWIR lenses with spherical surfaces has been done: an 8-lens lens with the effective focal length of 50 mm, the relative aperture of 1:1.4 and the angular field of view of 23° and a 6-lens lens with the effective focal length of 200 mm, the relative aperture of 1:2.4 and the angular field of view of 5.87°. Both lenses are designed to operate in the short-wave infrared range (SWIR, 0.9–2.3 μm) with matrix image detectors having a diagonal up to 20.5 mm. In the synthesized systems, the values of the diffraction polychromatic modulation transfer functions are found greater than in the considered commercial lenses. The modified differential evolution algorithm was used to find the design parameters of the lenses. The performed aberration analysis of the synthesized SWIR lenses and the comparison of their characteristics with commercial lens samples indicate the high quality of the image and the competitiveness of the designed samples. Thus, the applied design technique makes it possible to generate original high-quality optical schemes of multi-lens lenses for the short-wave infrared range, taking into account the requirements and limitations established by the designer.

**Keywords:** lens, short-wave infrared range (SWIR), automated design, global optimization, modulation transfer function (MTF), distortion.

### Вступ

Випромінювання в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (short-wave infrared range, SWIR), який охоплює довжини хвиль від 0,9 до 2,5 мкм та розміщується між ближнім інфрачервоним (NIR) і середньохвильовим (MWIR) діапазонами, має ряд унікальних фізичних характеристик [1, 2].

Характерна взаємодія SWIR-випромінювання з різними матеріалами відкриває можливості до його використання в численних технологічних і дослідницьких застосуваннях. Однією з ключових фізичних особливостей SWIR-випромінювання є його здатність проникати крізь ряд матеріалів, які є непрозорими для видимого світла. У порівнянні з іншими спектральними діапазонами, зображення, отримане в SWIR-діапазоні, може виявитися унікальним та більш інформативним [3, 4]. Все це дозволяє використовувати SWIR-випромінювання в технологіях візуалізації, де необхідно отримати деталізовану інформацію про внутрішню будову об'єктів без їх руйнування.

SWIR-камери відрізняються від MWIR- і LWIR-камер тим, що їх зображення не залежить від власної випромінювальної здатності об'єктів. Потенційно SWIR-камери можуть забезпечити більш контрастні зображення об'єктів, які самі не випромінюють значну теплову енергію [5]. Крім того, в порівнянні з камерами середньо- та довгохвильового інфрачервоного діапазону, SWIR-камери здатні утворювати зображення з більшою роздільною здатністю [6, 7].

Оскільки наразі спостерігається постійне вдосконалення технологій, матеріалів та виробничих процесів, SWIR-камери все більше з'являються у різних сферах – від сільського господарства, харчової промисловості та медичної візуалізації до контролю якості на автоматизованих виробничих лініях, безпеки/спостереження, автомобілебудування та навіть археології і мистецтва [8].

Важливим компонентом SWIR-камери є її оптична система (об'єктив). Разом з багатоелементним приймачами випромінювання об'єктиви визначають параметри якості кінцевого зображення. Довершені SWIR-камери потребують добре виправлених на монохроматичні та хроматичні аберації SWIR-об'єктивів з малим діафрагмовим числом ( $F/\#$ ) та високими значеннями модуляційних передавальних функцій (МПФ). Останнє стосується як цивільних, промислових застосувань, так і задач військового призначення [9-13].

Задача проектування оптичних систем SWIR-об'єктивів є складною і багатовимірною, особливо з урахуванням низки додаткових вимог розробника. Наразі серед публікацій не виявлено аналітичних способів розв'язання задачі проектування багатолінзових систем SWIR-об'єктивів. Тому для практичного вирішення цієї проблеми все частіше застосовуються чисельні методи глобальної оптимізації, інтегровані в спеціалізоване програмне забезпечення розрахунку оптичних систем [14-16].

В попередній роботі [17] автори провели успішний параметричний синтез світлосильного SWIR-об'єктива з фокусною відстанню 75 мм, кутовим полем зору  $15,5^\circ$  та відносним отвором 1:1,4 для функціонування у діапазоні 0,9...2,3 мкм з основною довжиною хвилі 1,4 мкм. В порівнянні з комерційним аналогом SWIR Lens 75mm F1.4 компанії Ortec [18], якість зображення отриманого об'єктива виявилася вищою. Зокрема, як свідчать поліхроматичні МПФ згенерованого об'єктива, на просторовій частоті 20 ліній/мм значення контрасту по всьому полю зору перевищило 40%, а відносна дисторсія становила 0,14% (для порівняння: на просторовій частоті 15 ліній/мм комерційний аналог забезпечує контраст до 28%, а його відносна дисторсія становить приблизно 0,2%).

В даному дослідженні розглянуті процедура та результати комп'ютерного параметричного синтезу оптичних систем SWIR-об'єктивів з меншою та більшою за 75 мм фокусною відстанню. Ці оптичні системи призначені для функціонування у широкому діапазоні (0,9...2,3 мкм).

### Постановка задачі досліджень

Метою даного дослідження була перевірка результативності шляхом чисельного моделювання автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем світлосильних об'єктивів зі сталими параметрами для короткохвильового інфрачервоного діапазону. Параметричний синтез здійснювався засобами стохастичної глобальної оптимізації, реалізованими в спеціалізованому програмному забезпеченні з проектування оптичних систем.

### Виклад основного матеріалу

В даній роботі для розроблення оптичних систем відносно світлосильних SWIR-об'єктивів було використане програмне забезпечення з автоматизованого проектування оптичних систем PODIL, у якому реалізований модифікований алгоритм стохастичної глобальної оптимізації. Функціональні можливості зазначеного програмного забезпечення раніше дозволили успішно згенерувати оригінальні оптичні схеми та знайти практично в автоматичному режимі (без активної участі розробника) конструктивні параметри удосконалених оптичних систем різного призначення та будови з урахуванням заданих вимог та обмежень [14].

На етапі підготовки до параметричного синтезу стартова оптична система об'єктива задавалася у формі довільних плоско-паралельних пластин.

Оціночна функція на першому етапі розрахунку встановлювалася для мінімізації середньоквадратичних розмірів поліхроматичних світлових плям для заданих точок поля зору, а вже на другому – для мінімізації поліхроматичних МПФ на фіксованій просторовій частоті. Такий підхід дозволив значно прискорити процедуру синтезу та уникнути невизначеності під час розрахунку значень МПФ стартової оптичної системи з занадто великими геометричними і хвильовими аберациями.

Далі встановлювалися діапазони на допустимі значення параметрів оптимізації, а також обмеження на загальну осьову довжину системи, мінімальне значення заднього фокального відрізка, мінімальні товщини лінз та повітряних проміжків на краю та максимальне допустиме значення відносної дисторсії.

Для забезпечення незмінного значення задньої фокусної відстані об'єктива під час оптимізації на останній оптичній поверхні SWIR-об'єктива був встановлений регулятор радіуса поверхні, який контролював вихідний кут з оптичною віссю апертурного променя.

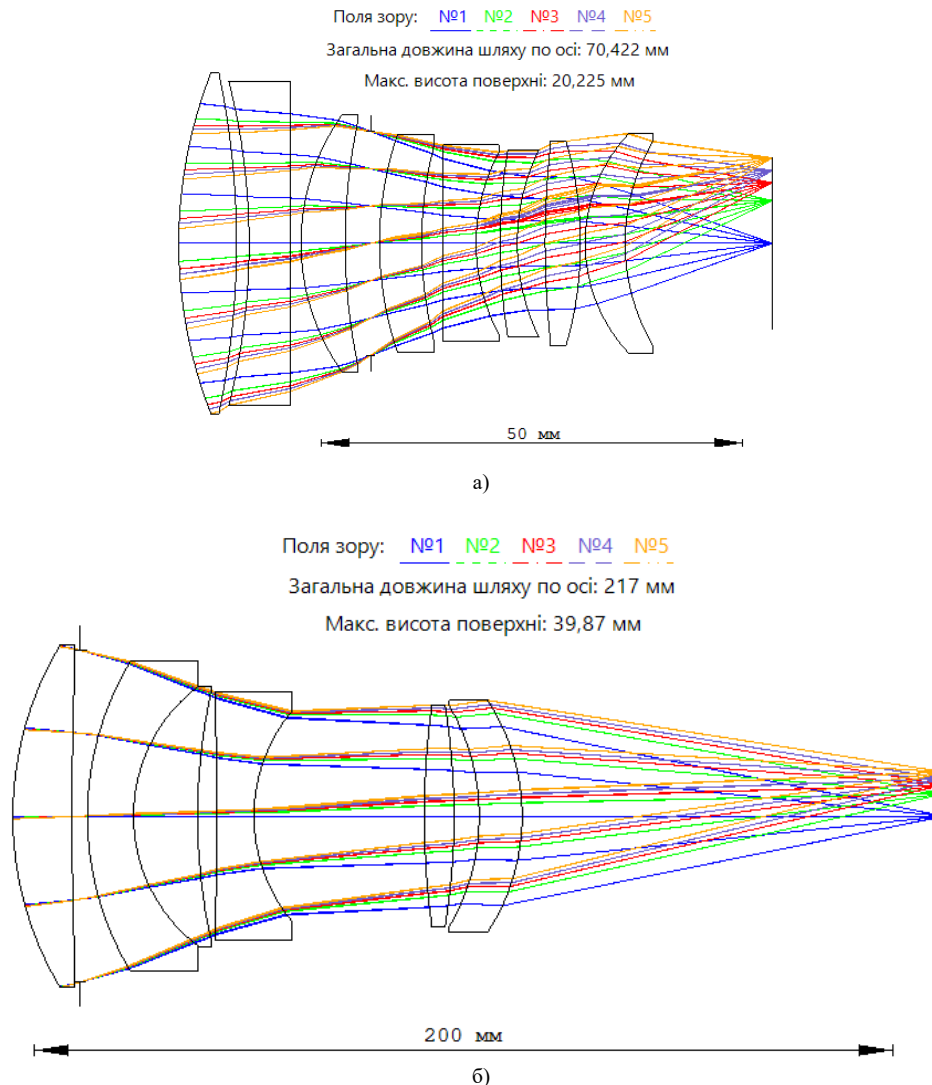
Для чисельного моделювання процедури синтезу в даній роботі були обрані оптичні системи двох SWIR-об'єктивів:

- 8-лінзового об'єктива з фокусною відстанню 50 мм, відносним отвором 1:1,4 та кутовим полем зору  $23^\circ$ ;
- 6-лінзового об'єктива з фокусною відстанню 200 мм, відносним отвором 1:2,4 та кутовим полем зору  $5,87^\circ$ .

Обидва об'єктиви призначені для функціонування у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні 0,9–2,3 мкм та мають комерційні аналоги з ідентичними функціональними параметрами [19, 20]. Вагові коефіцієнти для всіх шести використаних довжин хвиль (0,9, 1,1, 1,4, 1,7, 2 і 2,3 мкм) були встановлені

однаковими.

Як показало комп'ютерне моделювання, тривалість процедури розрахунку з кількістю змінних 35-50 потребує значної потужності комп'ютера. Зокрема, при роботі комп'ютера з процесором Intel Core i9-9900K в багатопоточному режимі та оптимізації значень поліхроматичних МПФ процедура синтезу сферичної оптичної системи об'єктива може займати біля 8 годин. Згенеровані алгоритмом глобальної оптимізації оптичні схеми двох SWIR-об'єктивів представлені на рис. 1.



**Рис. 1. Оптичні схеми з ходом променів синтезованих SWIR-об'єктивів:**  
а) з фокусною відстанню 50 мм, відносним отвором 1:1,4 та кутовим полем зору 23°;  
б) з фокусною відстанню 200 мм, відносним отвором 1:2,4 та кутовим полем зору 5,87°

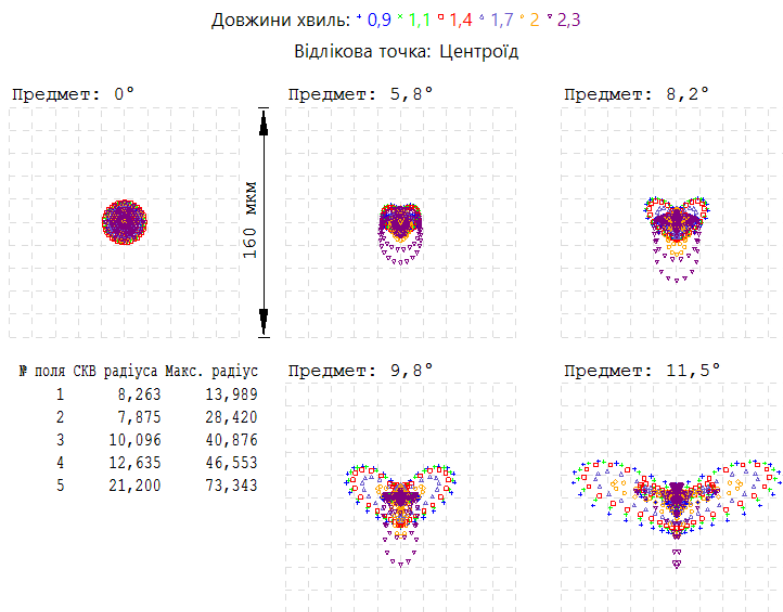
Як параметри оптимізації (змінні оптимізаційної моделі) в даному моделюванні використовувалися:

- радіуси оптичних поверхонь (фактично алгоритмом оптимізувалися кривизни поверхонь);
- осьові товщини лінз;
- повітряні проміжки між поверхнями;
- показники заломлення скла лінз;
- коефіцієнти дисперсії скла лінз.

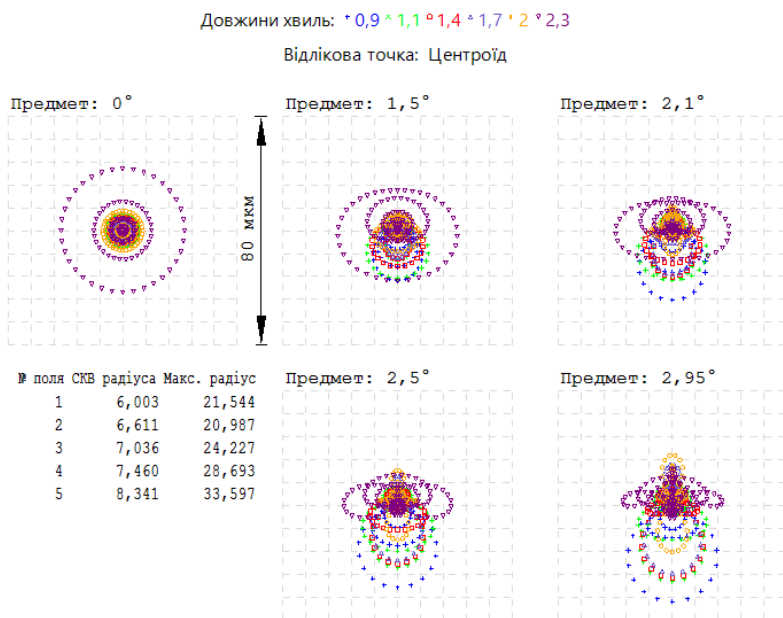
Марки скла для всіх лінз знаходилися програмою автоматично з обраного каталогу SCHOTT. Під час кожного оцінювання якості системи (так званої проби, тобто розрахунку оціночної функції) за поточними модельними значеннями показників заломлення та коефіцієнтів дисперсії в обраному каталозі скла знаходилися «найближчі» існуючі марки скла, дисперсійні параметри яких використовувалися далі для розрахунку фактичних значень показників заломлення лінз для всіх заданих довжин хвиль.

На рис. 2 зображені точкові діаграми пучків променів від різних предметних точок. Вони характеризують розподіл енергії в світлових плямах, утворених в площині зображення. В розглянутих системах середньоквадратичний радіус світлових плям на оптичній осі становить біля 6-8 мкм.

Максимальне абсолютне (за модулем) значення відносної дисторсії синтезованого об'єктива з фокусною відстанню 50 мм виявилося на рівні 0,3% (при заданому обмеженні 2,5%), а об'єктива з фокусною відстанню 200 мм – 0,021% (при заданому обмеженні 0,025%).



а)



б)

**Рис. 2. Точкові діаграми розробленого синтезованих SWIR-об'єктивів:**  
**а) з фокусною відстанню 50 мм, відносним отвором 1:1,4 та кутовим полем зору 23°;**  
**б) з фокусною відстанню 200 мм, відносним отвором 1:2,4 та кутовим полем зору 5,87°**  
 Поля зору №1...5 відповідають предметним точкам з відносними координатами 0; 0,5; 0,71; 0,85 і 1, відповідно

На рис. 3 і 4 наведені дифракційні поліхроматичні МПФ розроблених SWIR-об'єктивів для точок поля зору в центрі, середній зоні та на периферії. Ці графіки характеризують спроможність оптичної системи до формування якісного зображення, зокрема до передачі контрасту на різних просторових частотах. Представлені графіки свідчать про якісну корекцію аберацій, досягнуту в спектральному діапазоні 0,9-2,3 мкм по всьому полю зору. Зокрема, значення дифракційних поліхроматичних МПФ обох об'єктивів перевищують показники комерційних зразків [19, 20].

Як видно з наведених результатів, при ідентичних функціональних параметрах оптичних систем (задній фокусній відстані, відносному отворі, кутовому полі зору), кількості використаних лінз та максимально допустимій довжині системи синтезовані варіанти об'єктивів не поступаються розглянутим комерційним аналогам [19, 20] та за якістю утворюваного зображення є конкурентоздатними.

Таким чином, спосіб автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем, що базується на сучасному алгоритмі глобальної оптимізації, дозволяє згенерувати оригінальні високоякісні оптичні схеми багатолінзових об'єктивів для короткохвильового інфрачервоного діапазону з урахуванням встановлених конструктором вимог та обмежень.

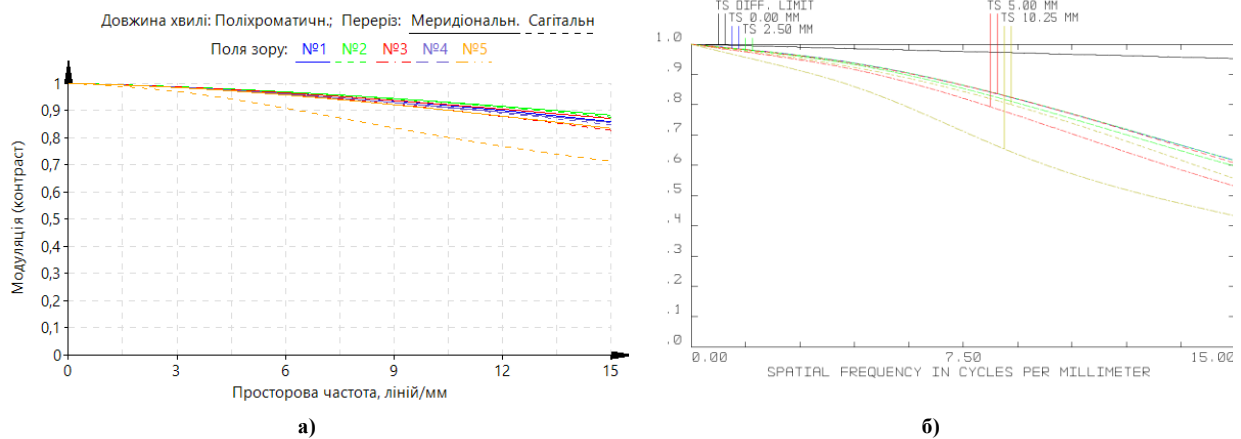


Рис. 3. Графіки дифракційних поліхроматичних МПФ SWIR-об’єктива з фокусною відстанню 50 мм, відносним отвором 1:1,4 та кутовим полем зору 23°: а) синтезований варіант; б) комерційний зразок

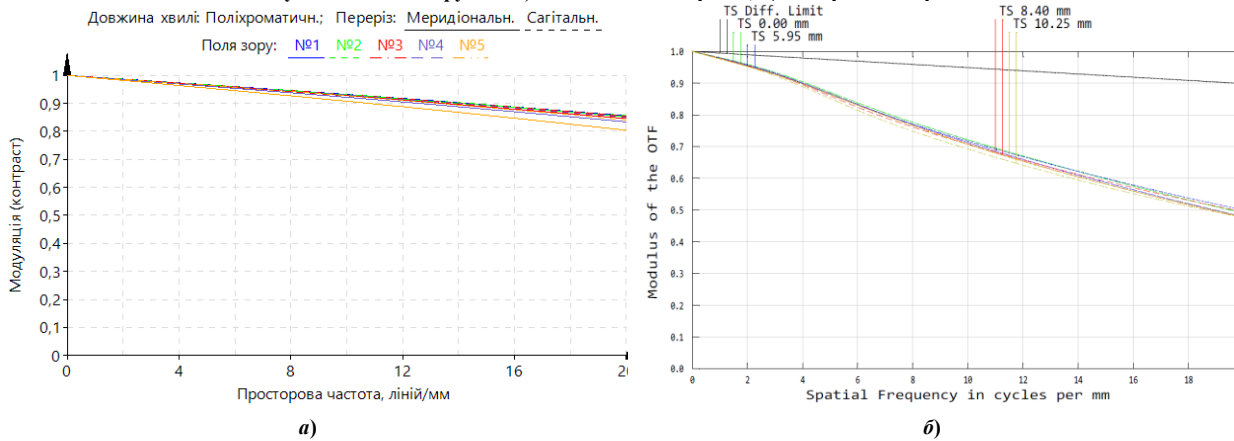


Рис. 4. Графіки дифракційних поліхроматичних МПФ SWIR-об’єктива з фокусною відстанню 200 мм, відносним отвором 1:2,4 та кутовим полем зору 5,87°: а) синтезований варіант; б) комерційний зразок

### Висновки

Результати параметричного синтезу світлосильних SWIR-об’єктивів підтверджують результативність автоматизованого методу проектування, який базується на сучасних засобах глобальної оптимізації. Проведений абераційний аналіз параметрів і характеристик отриманих оптичних систем об’єктивів свідчить про їх переваги та конкурентоздатність в порівнянні з відомими комерційними зразками з ідентичними функціональними параметрами. Розроблені варіанти двох SWIR-об’єктивів (з фокусною відстанню 50 мм і діафрагмовим числом F/1,4 та з фокусною відстанню 200 мм і діафрагмовим числом F/2,4) забезпечують високий рівень корекції монохроматичних і хроматичних аберацій без виньетування променів для кутового поля зору 23° і 5,87°, відповідно. Отримані оптичні системи SWIR-об’єктивів раціонально застосовувати в оптико-електронній апаратурі разом з матричними приймачами випромінювання, що мають діагональ світлочутливої площадки до 20,5 мм. Наступні дослідження можуть бути направлені в сторону проектування оптичних систем з поліпшеними функціональними параметрами та більш високою якістю зображення зі застосуванням «нестандартних» (дифракційних, асферичних) оптичних поверхонь.

### Література

1. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of photonics. – John Wiley & sons, 2019.
2. Vollmer, M. and Möllmann, K.-P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2nd Edition. Wiley-VCH, 2018. 794 p.
3. Stuart B. H. Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. – John Wiley & Sons, 2004.
4. Planinsic G. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. – 2011.
5. Thermal Imaging Using SWIR Camera Technology [Електронний ресурс] // Princeton Infrared Technologies. 2024. – Режим доступу: <https://www.princetonirtech.com/applications/thermal-imaging-in-swir>.
6. Perić D., Livada B. Analysis of SWIR imagers application in electro-optical systems // Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN. – 2017. – p. 05-08.
7. SWIR InGaAs Cameras [Електронний ресурс] // Pro-Lite Technology Ltd. 2024. – Режим доступу: <https://pro-lite.co.uk/products-services-index/photonics/cameras-image-sensors/swir-ingaas-cameras/>.
8. SWIR Imaging Optics [Електронний ресурс] // Sunex Inc. – 2021. – Режим доступу: <https://sunex.com/2021/02/17/swir/>.
9. Lynred to develop SWIR detector for Land Surface Temperature Monitoring mission [Електронний

- ресурс] // Laser Focus World. 2021. – Режим доступу: <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/14200972/lynred-to-develop-swir-detector-for-land-surface-temperature-monitoring-mission>.
10. IR microscopy with short-wave infrared (SWIR) cameras Goldeye [Електронний ресурс] // Allied Vision Technologies GmbH. 2024. – Режим доступу: <https://www.alliedvision.com/en/news/case-studies/tunnel-boring-machines-1/>.
11. SWIR Imager Military grade low SWaP-C SWIR Video Core [Електронний ресурс] // SCD Semiconductor Devices. 2019. – Режим доступу: [https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/SWIR\\_Imager\\_brochure\\_IL\\_v7.pdf](https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/SWIR_Imager_brochure_IL_v7.pdf).
12. SWIR camera [Електронний ресурс]. – SPI Infrared. 2020. – Режим доступу: <https://www.x26.com/swir-camera/>.
13. Short Wave Infrared (SWIR) for Surveillance Applications in Defense [Електронний ресурс] // ASP Laser Inc. 2016. – Режим доступу: [https://www.alliedscientificpro.com/blog/welcome-to-our-blogs-1/white-paper-short-wave-infrared-swir-for-surveillance-applications-in-defense-137#blog\\_content](https://www.alliedscientificpro.com/blog/welcome-to-our-blogs-1/white-paper-short-wave-infrared-swir-for-surveillance-applications-in-defense-137#blog_content).
14. Sokurenko, V. (2024). Automated Design of Multi-element Optical Systems for Various Purposes. In: Bezuglyi, M., Bouraou, N., Mykytenko, V., Tymchyk, G., Zaporozhets, A. (eds) Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 511. Springer, pp. 85–115, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_3).
15. Sokurenko V., Sokurenko O. “Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, KPI Science News, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.252085>.
16. Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М. Автоматизований синтез світлосильних об’єктивів для сучасних приладів нічного бачення // Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування. – 2024. – № 67(1), с. 18-24. [https://doi.org/10.20535/1970.67\(1\).2024.306721](https://doi.org/10.20535/1970.67(1).2024.306721).
17. Лавренюк Д. М., Сокурєнко В. М. Автоматизований розрахунок проєкційного об’єктива для короткохвильового інфрачервоного діапазону // Збірник праць XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. 16-17 травня. – 2023. – с. 56-59.
18. Optec SWIR Lens OB-SWIR75/1.4 – P/N C0811 [Електронний ресурс] // Optec S.p.A – Режим доступу: <https://ir.optec.eu/pdf/C0811.pdf>.
19. Optec SWIR Lens OB-SWIR50/1.4 – P/N C0810 [Електронний ресурс] // Optec S.p.A – Режим доступу: <https://ir.optec.eu/pdf/C0810.pdf>.
20. Optec SWIR Lens OB-SWIR200/2.4 – P/N C1116 [Електронний ресурс] // Optec S.p.A – Режим доступу: <https://ir.optec.eu/pdf/C1116.pdf>.

## References

1. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of photonics. – John Wiley & sons, 2019.
2. Vollmer, M. and Möllmann, K.-P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2nd Edition. Wiley-VCH, 2018. 794 p.
3. Stuart B. H. Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. – John Wiley & Sons, 2004.
4. Planinsic G. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. – 2011.
5. Thermal Imaging Using SWIR Camera Technology // Princeton Infrared Technologies. 2024. – Source link: <https://www.princetonirtech.com/applications/thermal-imaging-in-swir>.
6. Perić D., Livada B. Analysis of SWIR imagers application in electro-optical systems // Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN. – 2017. – p. 05-08.
7. SWIR InGaAs Cameras // Pro-Lite Technology Ltd. 2024. – Source link: <https://pro-lite.co.uk/products-services-index/photonics/cameras-image-sensors/swir-ingaas-cameras/>.
8. SWIR Imaging Optics // Sunex Inc. – 2021. – Source link: <https://sunex.com/2021/02/17/swir/>.
9. Lynred to develop SWIR detector for Land Surface Temperature Monitoring mission // Laser Focus World. 2021. – Source link: <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/14200972/lynred-to-develop-swir-detector-for-land-surface-temperature-monitoring-mission>.
10. IR microscopy with short-wave infrared (SWIR) cameras Goldeye // Allied Vision Technologies GmbH. 2024. – Source link: <https://www.alliedvision.com/en/news/case-studies/tunnel-boring-machines-1/>.
11. SWIR Imager Military grade low SWaP-C SWIR Video Core // SCD Semiconductor Devices. 2019. – Source link: [https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/SWIR\\_Imager\\_brochure\\_IL\\_v7.pdf](https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/SWIR_Imager_brochure_IL_v7.pdf).
12. SWIR camera. – SPI Infrared. 2020. – Source link: <https://www.x26.com/swir-camera/>.
13. Short Wave Infrared (SWIR) for Surveillance Applications in Defense // ASP Laser Inc. 2016. Source link: [https://www.alliedscientificpro.com/blog/welcome-to-our-blogs-1/white-paper-short-wave-infrared-swir-for-surveillance-applications-in-defense-137#blog\\_content](https://www.alliedscientificpro.com/blog/welcome-to-our-blogs-1/white-paper-short-wave-infrared-swir-for-surveillance-applications-in-defense-137#blog_content).
14. Sokurenko, V. (2024). Automated Design of Multi-element Optical Systems for Various Purposes. In: Bezuglyi, M., Bouraou, N., Mykytenko, V., Tymchyk, G., Zaporozhets, A. (eds) Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 511. Springer, pp. 85–115, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_3).
15. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, KPI Science News, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.252085>.
16. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated synthesis of fast lenses for modern night vision devices (in Ukrainian) // Visnyk NTUU "KPI". Seriya prykladobuduvannya. – 2024. – № 67(1), p. 18-24. [https://doi.org/10.20535/1970.67\(1\).2024.306721](https://doi.org/10.20535/1970.67(1).2024.306721).
17. Lavrenyuk D., Sokurenko V. Automated design of projection lens for проєкційного об’єктива для short-wave infrared range (in Ukrainian) // Zbirnyk pratz XVI vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh “Poglad u maibutne prykladobuduvannya”. Igor Sikorsky KPI. May 16-17. – 2023. – p. 56-59.
18. Optec SWIR Lens OB-SWIR75/1.4 – P/N C0811 // Optec S.p.A – Source link: <https://ir.optec.eu/pdf/C0811.pdf>.
19. Optec SWIR Lens OB-SWIR50/1.4 – P/N C0810 // Optec S.p.A – Source link: <https://ir.optec.eu/pdf/C0810.pdf>.
20. Optec SWIR Lens OB-SWIR200/2.4 – P/N C1116 // Optec S.p.A – Source link: <https://ir.optec.eu/pdf/C1116.pdf>.