

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-119>

УДК 681.7.520

СОКУРЕНКО ВЯЧЕСЛАВНаціональний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0001-5057-182X>e-mail: sokurenko2@meta.ua**ВОЛОЩУК БОГДАН**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»e-mail: volosb9@gmail.com**СОКУРЕНКО ОЛЕГ**ВСП «Оптико-механічний фаховий коледж
Київського національного університету імені Тараса Шевченка»<https://orcid.org/0000-0002-0335-6470>e-mail: opticsom@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ АСФЕРИЧНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ УЛЬТРАШИРОКОКУТНИХ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОБ'ЄКТИВІВ

У даному дослідженні проведена оцінка результативності методики автоматизованого синтезу асферичних оптичних систем світлосильних ультраширококутних інфрачервоних об'єктивів, яка реалізована на основі одного із сучасних алгоритмів стохастичної глобальної оптимізації. Розроблені дві чотирилінзові системи, які виконані з різних матеріалів. Оптичні системи мають фокусну відстань 3,8 мм, відносний отвір 1:1 та кут поля зору 150°. Обидва варіанти містять асферичні поверхні другого порядку та практично виправлені на тета-дисторсію. Фактичний діаметр кола зображення для обох систем становить 9,8 мм, що забезпечує сумісність з мікроболометричними матрицями формату 640×480 і 640×512 з розміром пікселів 12 мкм. Для синтезованих оптичних систем значення поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій, визначені для просторової частоти Найквіста 41,7 ліній/мм, перевищують 0,22 для всіх точок поля зображень та досягають 0,42 на осі. Аналіз результатів показав, що запропонований підхід дозволяє в автоматизованому режимі досягти високого ступеня корекції монохроматичних і хроматичних аберацій та забезпечує якісні оптичні характеристики світлосильних об'єктивів для довгохвильового інфрачервоного спектра.

Ключові слова: ультраширококутний об'єктив, інфрачервоний, медичні тепловізори, модуляційна передавальна функція, мікроболометрична матриця.

SOKURENKO VYACHESLAV**VOLOSCHUK BOHDAN**

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

SOKURENKO OLEG

Optical and mechanical professional college of Taras Shevchenko National University of Kyiv

AUTOMATED SYNTHESIS OF ASPHERICAL OPTICAL SYSTEMS FOR ULTRA-WIDE INFRARED LENSES

This study evaluates the effectiveness of the automated synthesis technique for aspheric optical systems of fast ultra-wide-angle infrared lenses. The synthesis is performed with one of modern stochastic global optimization algorithms. The designed two four-lens systems are practically corrected for theta distortion. They contain second-order aspheric surfaces and are designed of different lens materials. In the first optical system, all lenses are made of germanium. In another optical system, the material of the second lens is zinc selenide, and while other lenses are germanium. Zinc selenide has been used to test the potential for additional correction of chromatic aberrations. The systems have a focal length of 3.8 mm, a relative aperture of 1:1 and a field of view angle of 150°. Taking into account the distortion of real rays, the actual diameter of the image circle for both systems is 9.8 mm, which ensures compatibility with microbolometric sensors with 640×480 and 640×512 pixels having the size of 12 μm. When using a computer with an Intel Core i7 processor operating in multi-threaded mode, and optimizing the values of the polychromatic modulation transfer function, which requires intensive Fourier transform calculations, the optical design process of such systems can take up to 3 hours. For synthesized optical systems, the values of polychromatic diffraction modulation transfer functions determined for the Nyquist spatial frequency of 41.7 lines/mm exceed 0.22 for all given points and exceeds 0.42 on the axis. Applying zinc selenide in the second lens helped to improve the image quality at the periphery. Analysis of the results showed that the proposed approach enables to achieve automated correction of monochromatic and chromatic aberrations and provides high-quality optical characteristics of fast lenses for the long-wave infrared spectrum.

Keywords: ultra-wide-angle lens, infrared, medical thermal imagers, modulation transfer function, microbolometric sensor.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

Ультраширококутні оптичні системи у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (LWIR, 8–12 мкм) є важливим напрямом розвитку сучасної оптико-електронної техніки та фотоніки завдяки широкому спектру застосувань: від тепловізійного спостереження, медичної техніки й охоронних систем до дистанційного зондування Землі, супутникових платформ та космічних місій [1–4]. Такі LWIR-оптичні системи дозволяють отримати зображення великого поля зору, яке перевищує 120°, при малій власній масі.

Основними завданнями при проектуванні таких систем є забезпечення великого поля зору, високої просторово-частотної (роздільної) здатності та стабільності роботи за умов змінних температур і механічних навантажень.

Ряд ширококутних LWIR-об'єктивів було запропоновано різними розробниками як для наукових, так і комерційних систем. При цьому наразі реалізуються різні архітектури (табл. 1). Серед них найбільш поширеними є класичні лінзові об'єктиви з асферичними поверхнями [5-7]. Для екстремально широкого огляду розроблені системи типу «риб'яче око» (fish-eye) з полем зору біля 180°. Так, Дж. Жанг та колеги [8] запропонували LWIR-об'єктив такого типу з кутом поля зору 200°, низькою F-theta дисторсією (<6%) і високим контрастом (0,37) на просторовій частоті 42 ліній/мм. Суттєво знизити хроматизм, масу та енергоспоживання супутникових і метеорологічних приладів здатні катадіоптричні та дзеркально-лінзові системи [9, 10]. Відомі також мульти-модульні системи зі «зшивкою» поля зору для панорамного огляду понад 180° та різні гібридні конфігурації, які сприяють екстремальному розширенню поля [11, 12]. Нарешті, надзвичайно перспективним можна вважати напрям розроблення метаповерхонь та металінз. Потенційно їх застосування може призвести до радикального зменшення масо-габаритних параметрів техніки при збереженні широкого поля [13-17].

Серйозним викликом до розроблення об'єктивів з широким кутовим полем зору є належна корекція дисторсії, яка суттєво впливає на точність вирішення метричних задач дистанційного зондування та картографії. Для компенсації перспективних викривлень в ширококутних системах часто застосовують F-Theta ($f-\theta$) об'єктиви [18, 19]. Вони забезпечують в площині фотоприймача практично лінійну залежність величини зображення від кута поля зору, сприяють більш точним вимірюванням по зображенням та спрощують цифрову обробку. Все це особливо важливо для сканувальних систем з гальванометричними або MEMS-дзеркалами.

Таблиця 1

Варіанти побудови ультраширококутних LWIR-систем

Архітектура	Типовий кут поля зору	Основні переваги	Основні недоліки
Лінзові асферичні системи	До 150°	Відносна простота, висока пропускну здатність	Обмежена корекція аберацій
Системи типу «риб'яче око»	150°–180° та більше	Екстремально широкий огляд	Сильна дисторсія
Катадіоптричні системи	Біля 120°	Менший хроматизм, компактність	Складність виготовлення
Мульти-модульні системи	Більше 180°	Модульність, простіші лінзи	Складність зшивки
Гібридні системи зі зшиванням (stitching) зображення	120°–190°	Поєднання дзеркал і лінз	Калібрування, складність
Метаповерхні та металінзи	До 140°	Мала маса, ультратонкий дизайн	Обмежена ефективність

Матеріали для LWIR-оптики обирають з урахуванням прозорості в діапазоні 8–12 мкм, термічної стабільності та механічної міцності. Найбільш поширеними матеріалами є германій (Ge), цинковий селенід (ZnSe), цинковий сульфід (ZnS), халькогенідні марки скла, а також фторид кальцію (CaF) і фторид барію (BaF) [20-23]. Так, германій забезпечує високу прозорість, але характеризується великою густиною, ZnSe і ZnS поєднують прозорість та хорошу оброблюваність, а халькогенідне скло дозволяє виготовляти асферичні елементи з малою масою, хоч і не є надто міцним.

Іншим ключовим напрямком розвитку LWIR-апаратури є вдосконалення сенсорних технологій. В табл. 2 наведені сучасні варіанти мікроболометричних матриць, призначених для функціонування в далекій інфрачервоній області спектра.

Таблиця 2

Параметри сучасних неохолоджувальних тепловізійних матриць з розміром пікселів 12 мкм

Виробник / бренд	Модель / виріб	Кількість пікселів	Діагональ матриці, мм
Lynred	Lynred Pico640S [24]	640×480	9,6
Seek Thermal	Seek Thermal Mosaic Core (640) [25]	640×480	9,6
C.c.Hikmicro (Hikvision)	Hikmicro 640×512 VOx Sensor Modules [26]	640×512	9,8
Guide Infrared	Guide Infrared 640×512 LWIR Detector Module [27]	640×512	9,8
InfiRay (iRay)	InfiRay 640×512 VOx Detector used in RifleScope Rico Series-RH50Pro [28]	640×512	9,8
BAE Systems	Athena 640 [29]	640×480	9,6
FLIR (Teledyne)	FLIR Boson+ 640 [30]	640×512	9,8

Таким чином, розвиток ультраширококутних LWIR-систем відбувається у двох взаємопов'язаних

напрямах: вдосконалення оптичних архітектур (F-theta, катадіоптричні, метаповерхні) та підвищення якості сенсорів (зменшення розміру пікселя до 12 мкм і менше). Поєднання цих факторів забезпечує надзвичайно широке поле зору, високу точність, мінімальні габарити й енергоспоживання, відкриваючи нові можливості для безпілотних платформ, супутників та наукових місій.

Постановка задачі досліджень

Метою цього дослідження є оцінка дієздатності автоматизованого параметричного синтезу ультраширококутних оптичних систем для світлосильних лінзових асферичних об'єктивів, що функціонують у далекій інфрачервоній області спектру, за допомогою засобів комп'ютерного моделювання. Процес синтезу буде здійснюватися з використанням одного із сучасних алгоритмів стохастичної глобальної оптимізації, інтегрованого у спеціалізований програмний комплекс для проєктування різноманітних оптичних систем.

Виклад основного матеріалу

Для розв'язання складних та багатовимірних задач автоматизованого синтезу оптичних систем можуть ефективно застосовуватися сучасні методи стохастичної глобальної оптимізації. До них, зокрема, належать адаптивні варіанти диференціальної еволюції, які дозволяють ефективно знаходити глобальні оптимальні рішення в складних, багатofункціональних просторах параметрів [31-33].

Для автоматичного визначення конструктивних параметрів ширококутних асферичних об'єктивів в даному дослідженні застосовувалося програмне забезпечення PODIL, в який інтегрований модифікований алгоритм стохастичної глобальної оптимізації. Чисельні моделювання, які раніше проводилися з іншими оптичними системами, дозволяли на практиці знаходити високоякісні технічні розв'язки навіть у розширених просторах з кількістю пошукових параметрів 100 та більше [34, 35].

У даній роботі проведено автоматичний параметричний синтез двох світлосильних інфрачервоних об'єктивів з фокусною відстанню 3,8 мм, діафрагмовим числом F/1 та кутовим полем зору 150°, призначених для роботи у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (8–12 мкм).

Розглянуті в даному дослідженні оптичні системи відрізняються матеріалом лінз: в першій системі всі лінзи виготовлені з германію, а в другій одна (друга) лінза виконана з селеніду цинку, решта – з германію. Селенід цинку використовувався для перевірки можливості покращення якості корекції хроматичних абераций.

Базова методика чисельного розрахунку оптичних систем включала підготовчий етап та два етапи роботи оптимізатора. На підготовчому етапі задавалися основні параметри системи такі як кількість лінз (всього 4), довжини хвиль (п'ять значень: 8, 9, 10, 11 і 12 мкм; основна довжина хвилі – 10 мкм), відносні координати предметних точок (шість значень: 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 і 1), тип апертури (діаметр вхідної зіниці) та величина апертури (3,8 мм). Апертурна діафрагма розміщувалася між другою і третьою лінзами, а значення регулятора вихідного кута апертурного променя встановлювалося рівним 0,5 для фіксування сталого значення задньої фокусної відстані. Для досягнення високої та рівномірної якості зображення по полю зору значення вагових коефіцієнтів для всіх використаних довжин хвиль та предметних точок були встановлені рівними одиниці.

На підготовчому етапі були обрані змінні параметри та встановлені діапазони на допустимі їх значення відповідно до фізичних та технологічних вимог. В даному дослідженні оптимізація проводилася за такими параметрами як радіуси кривизни оптичних поверхонь, товщини лінз, осьові відстані між поверхнями та кінцеві коефіцієнти поверхонь. З метою забезпечення більшої технологічності конструкції коефіцієнти асферичності вищих порядків під час проєктування не застосовувалися.

Згенерована в програмі стартова оціночна функція за умовчанням включала мінімізацію середньоквадратичних радіусів світлових плям в площині зображень для заданих предметних точок. Ця оціночна функція доповнювалася такими конструктивними обмеженнями: загальний осьовий розмір системи (осьова відстань від зовнішньої поверхні об'єктива до площини встановлення світлочутливої поверхні матриці) – не більше 50 мм, світловий діаметр поверхонь – не більше 30 мм, задній фокальний відрізок – не менше 5 мм, допустимі значення осьових товщин лінз – від 2,5 мм до 3,5 мм, товщина лінз на краю – не менше 2 мм. Крім того, в даному дослідженні обмежувався кут падіння головних променів на оптичні поверхні – порогом 45° та максимально допустиме значення відносної тета-дисторсії по модулю – 1%.

Далі проводився перший запуск (прогін) алгоритму глобальної оптимізації, вбудованого в програму, який фактично в автоматичному режимі здійснював параметричний синтез оптичної систем з урахуванням встановлених технічних обмежень.

Перед другим запуском алгоритму до оціночної функції додавалися складові для максимізації значень дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій (МПФ). В даному дослідженні значення МПФ поліпшувалися в меридіональній і сагітальній площинах лише для однієї фіксованої просторової частоти. Для мікроболометричних матриць з розміром пікселів 12 мкм частота Найквіста становить 41,7 ліній/мм, що визначає граничну просторову частоту, яку можна відтворити даним сенсором без виникнення ефекту аліасингу. Тому вказане числове значення просторової частоти використовувалося для максимізації контрасту в представленому моделюванні.

Кількість пошукових змінних оптимізації в даному дослідженні була відносно невеликою та дорівнювала 24. При цьому увесь процес безпосереднього розрахунку на комп'ютері з процесором Intel Core i7-9750H тривав до 3 годин. Оптичні схеми об'єктивів, згенеровані автоматично алгоритмом, зображені на рис. 1.

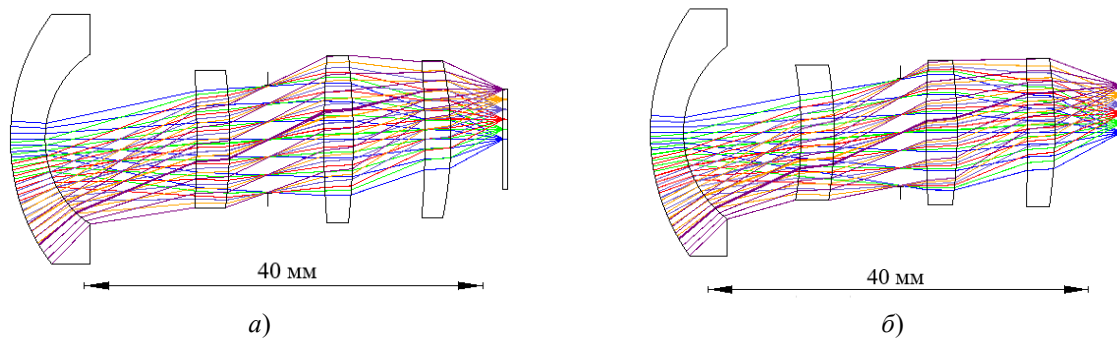


Рис. 1. Оптичні схеми з ходом променів синтезованих інфрачервоних об'єктивів з фокусною відстанню 3,8 мм, діафрагмовим числом $F/1$ та полем зору 150° : а) система, що містить всі лінзи з германію; б) система, в якій всі лінзи є з германієві, окрім другої – з селеніду цинку. Відносні координати предметних точок в меридіональній площині: поле №1 – 0; №2 – 0,2; №3 – 0,4; №4 – 0,6; №5 – 0,8; №6 – 1

Графіки поліхроматичних дифракційних МПФ для розглянутих шести точок поля зору показані на рис. 2. Результати показують, що значення МПФ для просторової частоти 41,7 ліній/мм перевищують 22% по всьому полю зору та досягають 42% на оптичній осі, сприяючи високому контрасту зображення.

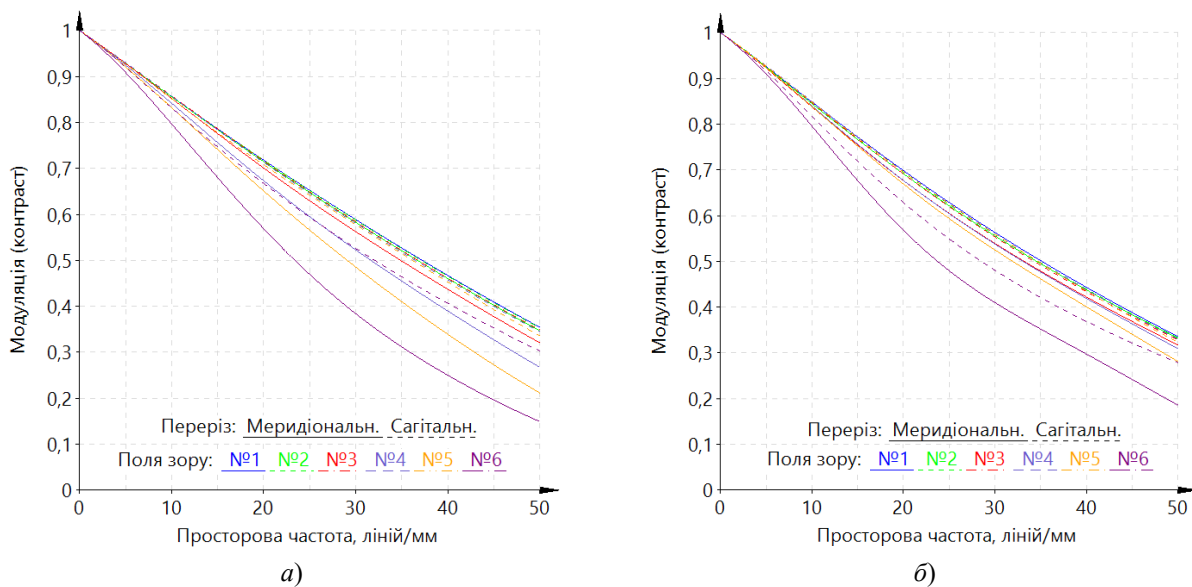


Рис. 2. Графіки дифракційних поліхроматичних МПФ розроблених об'єктивів: а) система, що містить всі лінзи з германію; б) система, в якій всі лінзи виготовлені з германію, окрім другої – з селеніду цинку

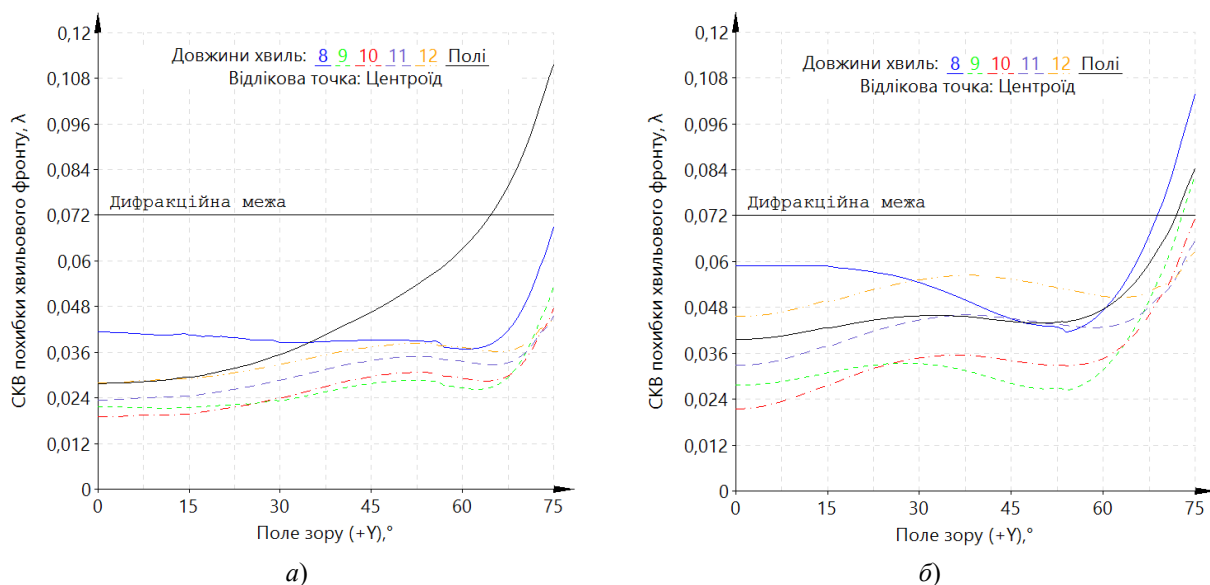


Рис. 3. СКВ-похибки функцій деформації хвильового фронту ультраширококутних інфрачервоних об'єктивів в залежності від кута поля зору: а) система, що містить всі лінзи з германію; б) система, в якій всі лінзи виготовлені з германію, окрім другої – з селеніду цинку

Графічні залежності від кута поля зору середньоквадратичних похибок хвильового фронту для різних довжин хвиль показані на рис. 3, а числа Штреля – на рис. 4. Отримані графіки свідчать про те, що обидві оптичні системи забезпечують практично по всьому полю зору високу якість зображення, близьку до дифракційної межі.

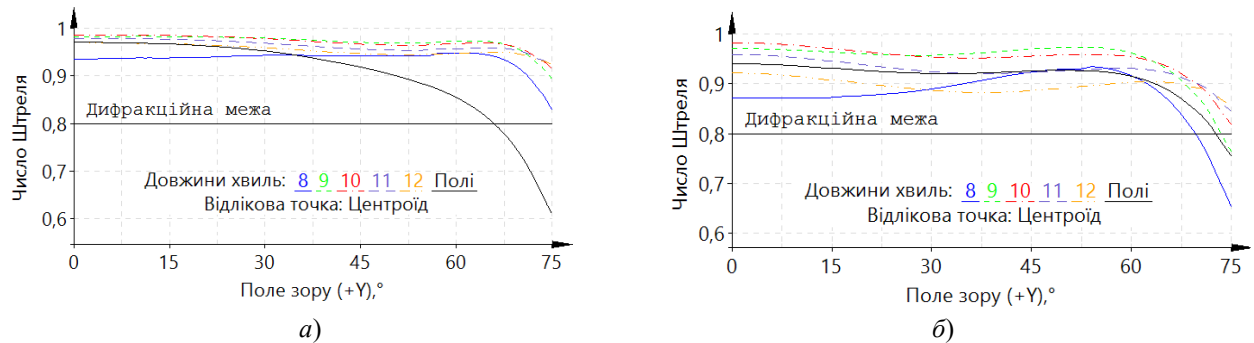


Рис. 4. Число Штреля ультраширококутних інфрачервоних об'єктивів в залежності від кута поля зору: а) система з лінзами з германію; б) система, в якій друга лінза виготовлена з селеніду цинку

Як видно з наведених графіків, використання селеніду цинку у другій лінзі дозволило покращити якість зображення на периферії порівняно з оптичною системою, що містить всі лінзи виключно з германію. Аналіз хвильового фронту в цій системі показав, що для всіх точок поля зору середньоквадратичні значення деформацій не перевищують $0,06 \lambda$, а число Штреля є суттєво більшим за дифракційну межу (0,8). Таким чином, запропоновані світлосильні ультраширококутні інфрачервоні об'єктиви забезпечують високу якість зображення, малі аберації та значення відносної тета-дисторсії, що не перевищує 1%.

Висновки

Застосована в дослідженні методика автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем на основі алгоритму глобальної стохастичної оптимізації дозволяє результативно створювати високоякісні світлосильні об'єктиви для довгохвильового інфрачервоного діапазону з урахуванням технічних обмежень та вимог розробника. Розроблені два зразки чотирилінзових асферичних систем з фокусною відстанню 3,8 мм, відносним отвором 1:1 та широким полем зору 150° забезпечують високий рівень корекції як монохроматичних, так і хроматичних аберацій, з діаметром кола зображення до 9,8 мм, сумісним із мікроболометричними матрицями з кількістю пікселів 640×480 і 640×512 та розміром пікселів 12 мкм. Синтезовані об'єктиви доцільно використовувати у різних тепловізійних приладах, які потребують ультраширокого кутового огляду. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук оптичних систем з покращеною якістю зображення та розширеними функціональними характеристиками шляхом застосування альтернативних матеріалів лінз та впровадження складних дифракційних елементів.

Література

1. Liu Q., Li M., Wang W., Jin S., Piao H., Jiang Y., Li N., Yao H. Infrared Thermography in Clinical Practice: a Literature Review. *European Journal of Medical Research*. 2025; 30:33. URL: <https://doi.org/10.1186/s40001-025-02278-z>.
2. Ndlovu H.S., Odindi J., Sibanda M., Mutanga O., et al. A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2368933>.
3. Tang, G., Zhang, T., Wu, W., Zhao, B., Miao, J., Li, D., Liu, X., Wang, J., Li, C. Spaceborne Lightweight and Compact High-Sensitivity Uncooled Infrared Remote Sensing Camera for Wildfire Detection. *Remote Sensing*, 17(8):1387. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/rs17081387>.
4. Schifano, L., Smeesters, L., Berghmans, F., Dewitte, S. Wide-Field-of-View Longwave Camera for the Characterization of the Earth's Outgoing Longwave Radiation. *Sensors*, 21(13):4444. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/s21134444>.
5. SupIR 4.2 mm f/1.4 LWIR HD Imaging Lens – product page. Ophir Optonics Solutions Ltd. 2025. URL: <https://op.pl.mks.com/en/f/fixed-4.2mm-f-1.4-lwir-hd-imaging-lens>.
6. SupIR 2.6 mm f/1.4 Fixed Focus XGA LWIR Imaging Lenses – product page. Ophir Optonics Solutions Ltd. 2025. URL: <https://www.ophiropt.com/en/f/fixed-2.6mm-f-1.4-lwir-hd-imaging-lens>.
7. The Teledyne FLIR Boson/Boson+. InfraredCameras Inc. 2025. URL: <https://buy.infraredcameras.com/collections/boson-and-boson-plus>.
8. Zhang, J.; Sun, L.; Qin, T. Design of long-wave infrared fisheye staring optical system. *Infrared and Laser Engineering*, 51(11), 20220430. 2022. URL: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220430>.
9. Marks, D. L.; Hagen, N.; Durham, M.; Brady, D. J. Wide-field compact catadioptric telescope spanning 0.7–14 μm wavelengths. *Applied Optics*, 52(18), pp. 4334–4342. 2013. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.52.004334>.
10. Yang, S. et al. (2022). Design and realization of catadioptric long wave infrared system. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104111. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104111>.

11. Wang, Y.; Mao, S.; Zhao, J. Ultra-Wide-Field Long-Wave Infrared System via Hybrid Refractive–Reflective Structure and Field of View Stitching. *Photonics*, 12(5), 453. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics12050453>.
12. Dual-FOV LWIR Optical Lens 40/120 mm f/1.2/0.9. Quanhom Technology Co., LTD. 2025. URL: <https://www.quanhom.com/pid18307873/Dual-FOV-LWIR-Optical-Lens-40-120mm-f-1-2-0-9.htm>
13. M. Meem, S. Banerji, A. Majumder, F.G. Vasquez, B. Sensale-Rodriguez, & R. Menon, Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116 (43), pp. 21375–21378. 2019. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1908447116>.
14. Orrin Kigner, Monjurul Meem, Brian Baker, Sourangsu Banerji, Philip W. C. Hon, Berardi Sensale-Rodriguez, and Rajesh Menon, "Monolithic all-silicon flat lens for broadband LWIR imaging," *Opt. Lett.* 46, pp. 4069–4071. 2021. URL: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-46-16-4069>
15. Lin, H.-I.; Geldmeier, J.; Baleine, E. et al. (2023). Wide-Field-of-View long-wave infrared metalenses. *SPIE Proceedings Volume 12530, Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR VIII*; 125300I. 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2661943>.
16. Wirth-Singh, A.; Fröch, J. E.; Han, Z.; Huang, L.; Mukherjee, S.; Zhou, Z.; Coppens, Z.; Böhringer, K. F.; Majumdar, A., "Large field-of-view thermal imaging via all-silicon meta-optics," *Appl. Opt.* 62, pp. 5467–5474 2023. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-62-20-5467>
17. Huang, L. et al. Broadband thermal imaging using meta-optics. *Nature Communications*. 15, Article 1662. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45904-w>.
18. Wang, L.; Chen, K.; Kang, X.; Zheng, H. Numerical Iterative Design and Analysis of Double Freeform Surface Telecentric F-Theta Lens. *Sensors (Basel)*. 25(16), Article 4949. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/s25164949>.
19. May, K. H.; Mohammadzadeh, S.; Keil, A.; von Freymann, G.; Friederich, F. Coherent Off-Axis Terahertz Tomography with a Multi-Channel Array and f-theta Optics. *Sensors (Basel)*. 24(2), Article 529. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/s24020529>.
20. Symmons, A. & Lifshutz, M. *Field Guide to Infrared Optical Materials*. SPIE Press, 210 p. 2021. URL: <https://doi.org/10.1117/3.2589608>.
21. Wang, P., Wang, X., Guo, H., Zhang, P., Wang, S., Jia, S., Farrell, G. & Dai, S. *Mid-Infrared Fluoride and Chalcogenide Glasses and Fibers*. Progress in Optical Science and Photonics, vol. 18. Springer, xvi + 373 p. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7941-4>.
22. S., Tan, W. & Wei, S.-H. (Eds.) *Emergent Micro- and Nanomaterials for Optical, Infrared, and Terahertz Applications*. CRC Press, 443 p. 2023. <https://doi.org/10.1201/9781003202608>.
23. Harris, D. C. *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*, 2nd edn. SPIE Press Monograph, vol. 368, 872 p. 2024. <https://doi.org/10.1117/3.100006>.
24. Pico640S BB 7-14 – Uncooled LWIR VGA Detector. Product page. Lynred. 2024. URL: <https://www.lynred.com/products/pico640s-bb-7-14>.
25. Thermal Core 640 – LWIR Ultra Compact Infrared Uncooled Thermal Core Module. Product page. Pyrosensio 2025. URL: <https://pyrosensio.com/product/thermal-imaging-cameras/thermal-camera-core>
26. Hikmicro (Hikvision). Uncooled VOx LWIR Sensor Modules (640×512, 12 μm). Product page. 2025. URL: <https://www.hikmicrotech.com>.
27. Guide Infrared. IR512M – 640×512 LWIR Detector Module. Product description. URL: <https://www.guideir.com>.
28. Thermal Imaging Rifle Scope Rico Series-RH50Pro. InfiRay (iRay). Product specifications. 2025. URL: <https://www.infiray.com>. <https://www.infirayoutdoor.com/rh50pro>.
29. Athena 640 Family of Products. BAE Systems. Product specifications. 2025. URL: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core>.
30. Teledyne FLIR BOSON 640×512 18mm 24° HFOV – LWIR Thermal Camera Core. Product page. RHP International, Inc. 2025. URL: <https://www.flircameras.com/product/flir-boson-640x480-18mm-hfm>.
31. Lin S., Xu H., An adaptive differential evolution algorithm based on adaptive evolution strategy and diversity enhancement, *Results in Engineering*, Volume 27, 106551. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106551>.
32. Zhang, Z., & Li, Y. A novel hybrid adaptive differential evolution for global optimization. *Scientific Reports*, 14(1), 1234. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70731-w>.
33. Lin X., Meng Z., An adaptive differential evolution with enhanced diversity and restart mechanism. *Expert Systems with Applications*, Volume 249, Part B, 123634. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123634>.
34. Sokurenko, V. 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. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_3.
35. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. URL: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.252085>.

References

1. Liu Q., Li M., Wang W., Jin S., Piao H., Jiang Y., Li N., Yao H. Infrared Thermography in Clinical Practice: a Literature Review. *European Journal of Medical Research*. 2025; 30:33. URL: <https://doi.org/10.1186/s40001-025-02278-z>.
2. Ndlovu H.S., Odindi J., Sibanda M., Mutanga O., et al. A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2368933>.
3. Tang, G., Zhang, T., Wu, W., Zhao, B., Miao, J., Li, D., Liu, X., Wang, J., Li, C. Spaceborne Lightweight and Compact High-Sensitivity Uncooled Infrared Remote Sensing Camera for Wildfire Detection. *Remote Sensing*, 17(8):1387. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/rs17081387>.
4. Schifano, L., Smeesters, L., Berghmans, F., Dewitte, S. Wide-Field-of-View Longwave Camera for the Characterization of the Earth's Outgoing Longwave Radiation. *Sensors*, 21(13):4444. 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/s21134444>.
5. SupIR 4.2 mm f/1.4 LWIR HD Imaging Lens – product page. Ophir Optronics Solutions Ltd. 2025. URL: <https://op.pl.mks.com/en/f/fixed-4.2mm-f-1.4-lwir-hd-imaging-lens>.
6. SupIR 2.6 mm f/1.4 Fixed Focus XGA LWIR Imaging Lenses – product page. Ophir Optronics Solutions Ltd. 2025. URL: <https://www.ophiropt.com/en/f/fixed-2.6mm-f-1.4-lwir-hd-imaging-lens>.
7. The Teledyne FLIR Boson/Boson+. InfraredCameras Inc. 2025. URL: <https://buy.infraredcameras.com/collections/boson-and-boson-plus>.
8. Zhang, J.; Sun, L.; Qin, T. Design of long-wave infrared fisheye staring optical system. *Infrared and Laser Engineering*, 51(11), 20220430. 2022. URL: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220430>
9. Marks, D. L.; Hagen, N.; Durham, M.; Brady, D. J. Wide-field compact catadioptric telescope spanning 0.7–14 μm wavelengths. *Applied Optics*, 52(18), pp. 4334–4342. 2013. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.52.004334>.
10. Yang, S. et al. (2022). Design and realization of catadioptric long wave infrared system. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104111. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104111>.
11. Wang, Y.; Mao, S.; Zhao, J. Ultra-Wide-Field Long-Wave Infrared System via Hybrid Refractive–Reflective Structure and Field of View Stitching. *Photonics*, 12(5), 453. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics12050453>.
12. Dual-FOV LWIR Optical Lens 40/120 mm f/1.2/0.9. Qunhom Technology Co., LTD. 2025. URL: <https://www.qunhom.com/pid18307873/Dual-FOV-LWIR-Optical-Lens-40-120mm-f-1-2-0-9.htm>
13. M. Meem, S. Banerji, A. Majumder, F.G. Vasquez, B. Sensale-Rodriguez, & R. Menon, Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116 (43), pp. 21375–21378. 2019. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1908447116>.
14. Orrin Kigner, Monjurul Meem, Brian Baker, Sourangsu Banerji, Philip W. C. Hon, Berardi Sensale-Rodriguez, and Rajesh Menon, "Monolithic all-silicon flat lens for broadband LWIR imaging," *Opt. Lett.* 46, pp. 4069–4071. 2021. URL: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-46-16-4069>
15. Lin, H.-I.; Geldmeier, J.; Baleine, E. et al. (2023). Wide-Field-of-View long-wave infrared metalenses. *SPIE Proceedings Volume 12530, Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR VIII*; 125300I. 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2661943>.
16. Wirth-Singh, A.; Frösch, J. E.; Han, Z.; Huang, L.; Mukherjee, S.; Zhou, Z.; Coppens, Z.; Böhringer, K. F.; Majumdar, A., "Large field-of-view thermal imaging via all-silicon meta-optics," *Appl. Opt.* 62, pp. 5467–5474 2023. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-62-20-5467>
17. Huang, L. et al. Broadband thermal imaging using meta-optics. *Nature Communications*. 15, Article 1662. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45904-w>.
18. Wang, L.; Chen, K.; Kang, X.; Zheng, H. Numerical Iterative Design and Analysis of Double Freeform Surface Telecentric F-Theta Lens. *Sensors (Basel)*, 25(16), Article 4949. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/s25164949>.
19. May, K. H.; Mohammadzadeh, S.; Keil, A.; von Freymann, G.; Friederich, F. Coherent Off-Axis Terahertz Tomography with a Multi-Channel Array and F-theta Optics. *Sensors (Basel)*. 24(2), Article 529. 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/s24020529>.
20. Symmons, A. & Lifshitz, M. *Field Guide to Infrared Optical Materials*. SPIE Press, 210 p. 2021. URL: <https://doi.org/10.1117/3.2589608>.
21. Wang, P., Wang, X., Guo, H., Zhang, P., Wang, S., Jia, S., Farrell, G. & Dai, S. *Mid-Infrared Fluoride and Chalcogenide Glasses and Fibers*. Progress in Optical Science and Photonics, vol. 18. Springer, xvi + 373 p. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7941-4>.
22. S., Tan, W. & Wei, S.-H. (Eds.) *Emergent Micro- and Nanomaterials for Optical, Infrared, and Terahertz Applications*. CRC Press, 443 p. 2023. <https://doi.org/10.1201/9781003202608>.
23. Harris, D. C. *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*, 2nd edn. SPIE Press Monograph, vol. 368, 872 p. 2024. <https://doi.org/10.1117/3.100006>.
24. Pico640S BB 7-14 – Uncooled LWIR VGA Detector. Product page. Lynred. 2024. URL: <https://www.lynred.com/products/pico640s-bb-7-14>.
25. Thermal Core 640 – LWIR Ultra Compact Infrared Uncooled Thermal Core Module. Product page. Pyrosensio 2025. URL: <https://pyrosens.com/product/thermal-imaging-cameras/thermal-camera-core>
26. Hikmicro (Hikvision). Uncooled VOx LWIR Sensor Modules (640×512, 12 μm). Product page. 2025. URL: <https://www.hikmicrotech.com>.
27. Guide Infrared. IR512M – 640×512 LWIR Detector Module. Product description. URL: <https://www.guideir.com>.
28. Thermal Imaging Rifle Scope Rico Series-RH50Pro. InfiRay (iRay). Product specifications. 2025. URL: <https://www.infiray.com>.
29. Athena 640 Family of Products. BAE Systems. Product specifications. 2025. URL: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core>.
30. Teledyne FLIR BOSON 640×512 18mm 24° HFOV – LWIR Thermal Camera Core. Product page. RHP International, Inc. 2025. URL: <https://www.flircameras.com/product/flir-boson-640x480-18mm-hm>.
31. Lin S., Xu H., An adaptive differential evolution algorithm based on adaptive evolution strategy and diversity enhancement, *Results in Engineering*, Volume 27, 106551. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106551>.
32. Zhang, Z., & Li, Y. A novel hybrid adaptive differential evolution for global optimization. *Scientific Reports*, 14(1), 1234. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70731-w>.
33. Lin X., Meng Z., An adaptative differential evolution with enhanced diversity and restart mechanism. *Expert Systems with Applications*, Volume 249, Part B, 123634. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123634>.
34. Sokurenko, V. 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. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_3.
35. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated design of zoom rifle scope with extended parameters", *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. URL: <https://doi.org/10.20535/kpsn.2022.1-2.252085>.