

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)

ЯЦЕНКО АНДРІЙ

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»e-mail: [andriyatsenko05@gmail.com](mailto:andriyatsenko05@gmail.com)

## АВТОМАТИЗОВАНЕ РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ СВІТЛОСИЛЬНИХ АСФЕРИЧНИХ ОБ'ЄКТИВІВ ДЛЯ ДОВГОХВИЛЬОВОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

В даному дослідженні виконано перевірку ефективності методики синтезу нових оптичних систем світлосильних об'єктивів, яка базується на алгоритмі стохастичної глобальної оптимізації. Так, здійснено автоматизований абераційний синтез чотирьох оптичних систем чотирьохлинзових асферичних об'єктивів з фокусною відстанню 50 мм з відносним отвором від 1:0,65 до 1:1 та кутовим полем зору  $16^\circ$  і  $25^\circ$ , які призначені для функціонування в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (8–12 мкм) з фотоприймачами випромінювання на базі мікроболометричних матриць з діагоналлю 14 мм та 22 мм. Для всіх згенерованих оптичних схем значення поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, визначених дифракційному наближенні, виявилися для просторової частоти 40 ліній/мм більшими за 0,4 по всьому полю зображень. Представлені результати розрахунку світлосильних об'єктивів підтверджують практичну спроможність запропонованої методики досягти високий рівень коригування як монохроматичних, так і хроматичних аберацій в оптичних системах світлосильних інфрачервоних об'єктивів з застосуванням германію і селеніду цинку.

Ключові слова: асферичний об'єктив, довгохвильовий інфрачервоний діапазон, автоматизоване проектування, якість зображення, германій, селенід цинку.

SOKURENKO VYACHESLAV

YATSENKO ANDRIY

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

### AUTOMATED DESIGN OF OPTICAL SYSTEMS OF FAST ASPHERICAL LENSES FOR LWIR SPECTRUM

In this research, a numerical technique has been experimentally applied for developing extremely fast optical lens systems with a fixed focal length for long-wave infrared range (LWIR) providing the high image quality. In particular, the automated procedure utilizing a modified version of a modern stochastic global optimization algorithm was examined during generating new optical systems of fast infrared lenses. In this paper, the aberration synthesis was done for a few 4-lens optical systems with the effective focal length of 50 mm, a F-number of 0.65 to 1, and angular field of view  $16^\circ$  and  $25^\circ$ . These optical systems are intended to be applied in the long wave infrared spectrum with microbolometer image sensors with a diagonal of the sensitive area equal to 14 mm and 22 mm. The numerical simulations of the optical design process have indicated that the applied global optimization algorithm needs a serious computational time interval when a total number of optimization variables approximately equals to 50. Particularly, when using a personal computer with the Intel Core i9 processor operating in multi-threaded mode and when optimizing the modulation transfer function values (that requires multiple fast Fourier transforms), the optical design process may take 10 hours or more. In all designed infrared lenses, the residual value of the relative distortion was less than 1%, while the polychromatic modulation transfer function values at the spatial frequency of 40 lines/mm exceeded 40% for the whole field of view. The presented results confirmed the practical effectiveness of the numerical technique to generate automatically well-corrected both onto monochromatic and chromatic aberrations fast aspheric LWIR lenses utilizing germanium and zinc selenide.

Keywords: aspherical lens, long-wave infrared range (LWIR), automated design, image quality, germanium, zinc selenide.

### Вступ

В умовах постійного вдосконалення технологій та збільшення вимог до якості й надійності технічних систем, особливе місце займають оптичні системи, що функціонують у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (long-wave infrared, LWIR). Завдяки своїй здатності реєструвати теплове випромінювання, тепловізійні системи знаходять широке застосування у військовій техніці, системах безпеки, тепловізійних приладах для промислового контролю, медичних пристроях, а також в астрономічних дослідженнях [1-3].

Одним із найважливіших функціональних параметрів інфрачервоних оптичних систем є їхній відносний отвір, який безпосередньо впливає на здатність системи виявляти слабке теплове випромінювання від віддалених об'єктів. Великий відносний отвір підвищує рівень опроміненості сенсора і може забезпечити більш стабільну роботу в умовах малого теплового контрасту. Окрім цього параметра, оптичні системи тепловізійних приладів повинні відповідати вимогам щодо належної корекції аберацій та значної прозорості матеріалів лінз в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні [1-3].

Через потребу максимального коефіцієнта пропускання, сучасні інфрачервоні оптичні системи рідко коли містять більше чотирьох лінз. Тому для досягнення високої якості зображення розробнику доводиться збільшувати кількість корекційних параметрів, застосовуючи асферичні оптичні поверхні другого і вищих порядків. Крім того, задача проектування ускладнюється ще й тим, що для виправлення хроматичних аберацій в арсеналі конструктора є доволі обмежений набір матеріалів, найпоширенішими серед яких є германій (Ge), селенід цинку (ZnSe), сульфід цинку (ZnS) та халькогенідне скло [4].

На рис. 1 зображені комерційні зразки світлосильних об'єктивів від відомих світових виробників. Коефіцієнт пропускання таких об'єктивів може перевищувати 85%. Крім того, вони здатні працювати в широкому діапазоні температур.



Рис. 1. Комерційні варіанти інфрачервоних об'єктивів: а) об'єктив GASIR® 60 мм, F/0,95 компанії Umicore's [5]; б) об'єктив SupIR 20mm f/0.85 компанії Ophir Optronics Solutions Ltd [6]

На жаль, через значну багатовимірність самої задачі параметричного синтезу складних багатолінзових оптичних систем, на сьогодні авторам не відомі аналітичні методи їх чисельного розрахунку. Застосування каталогів оптичних систем, архівних джерел та абераційної теорії третього або вищих порядків не завжди може привести до якісного результату. Насамперед це стосується світлосильних багатолінзових оптичних систем [7-9]. Тому доволі перспективним напрямком, який доводить свої переваги, можна вважати розроблення та застосування удосконалених програмних інструментів, в основу яких покладені потужні алгоритми глобальної оптимізації [наприклад, 10-12]. Потенційно вони спроможні за відносно обмежений часовий інтервал знайти бажаний розв'язок з урахуванням встановлених конструктором додаткових обмежень та технічних вимог.

В даній роботі чисельним моделюванням досліджені можливості комп'ютерного синтезу високоякісних оптичних систем світлосильних об'єктивів з фіксованою фокусною відстанню, добре виправлених на дисторсію, монохроматичні та хроматичні аберації.

#### Постановка задачі досліджень

Метою даного дослідження є перевірка шляхом комп'ютерного моделювання результативності автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем світлосильних об'єктивів для далекої інфрачервоної області спектру. Параметричний синтез буде здійснюватися алгоритмом стохастичної глобальної оптимізації, закладеним в спеціалізоване програмне забезпечення з розрахунку оптичних систем довільної складності.

#### Виклад основного матеріалу

В даній роботі було для автоматичного генерування конструктивних параметрів оптичних систем світлосильних інфрачервоних об'єктивів задіяне програмне забезпечення PODIL. В ньому реалізований модифікований алгоритм стохастичної глобальної оптимізації. Функціональні можливості даного програмного забезпечення дають змогу автоматично генерувати удосконалені оптичні системи різного типу, які можуть виявитися за своєю будовою абсолютно оригінальними [13-15].

Базова методика чисельного розрахунку оптичних систем зводилася до таких дії. На підготовчому етапі загальна кількість лінз в оптичній системі (в даному дослідженні їх 4), вводилися основна і додаткові довжини хвиль, координати декількох предметних (в даному дослідженні їх 5), задавалися тип і величина апертури оптичної системи (в даному дослідженні це була вхідна зіниця).

Далі користувач обирав змінні (оптимізаційні параметри) та встановлював діапазони на їх значення, допустимі з точки зору фізичних або технологічних вимог. В даному дослідженні як параметри оптимізації спочатку використовувалися радіуси оптичних поверхонь, товщини лінз, осьові відстані між поверхнями і кінчні коефіцієнти поверхонь. Надалі (вже на другому етапі) до цих параметрів долучалися коефіцієнти парної асферики оптичних поверхонь від четвертого до восьмого порядків.

В програмі генерувалася базова (стандартна за умовчанням) оціночна функція. Як правило, критерієм оптимальності є мінімальні значення середньоквадратичних радіусів світлових плям або функції деформації хвильового фронту для всіх заданих предметних точок. Оціночна функція доповнювалася обмеженнями на товщини лінз та повітряні проміжки на краю, а також максимальне значення відносної дисторсії.

На завершальному етапі проектування оптичних систем оціночні функції доповнювалися складовими елементами для мінімізації значень поліхроматичних модуляційних передавальних функцій (МПФ), розрахованих в дифракційному наближенні для фіксованої просторової частоти 20 ліній/мм.

Далі запускався алгоритм глобальної оптимізації, вбудований в програму, який й здійснював безпосередньо параметричний синтез оптичної систем з урахуванням встановлених конструктором обмежень. Важливо відмітити, що сама процедура оптимізації вже не потребувала участі конструктора, адже вона

повністю автоматична.

В даній роботі для здійснення чисельного моделювання були обрані 4-лінзові об'єктиви з фокусною відстанню 50 мм. Три з цих об'єктивів мають кутове поле зору  $16^\circ$  та діафрагмове число  $F/0,65$ ,  $F/0,75$  і  $F/0,85$ , а один об'єktiv – кутове поле зору  $25^\circ$  та діафрагмове число  $F/1$ . Розглянуті об'єктиви призначені для роботи у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (8–12 мкм, основна довжина випромінювання – 10 мкм). Для забезпечення збалансованості якості зображення по полю зору значення вагових коефіцієнтів були встановлені рівними одиниці для всіх п'яти використаних довжин хвиль (8, 9, 10, 11 і 12 мкм).

Як матеріал трьох лінз був обраний германій, проте для поліпшення якості корекції хроматичних аберацій матеріалом другої лінзи слугував селенід цинку.

Для отримання більш технологічних схем об'єктивів в оціночну функцію були внесені обмеження на загальний осьовий розмір системи (осьова відстань від зовнішньої поверхні об'єктива до площини встановлення світлочутливої поверхні матриці) – 100 мм, мінімальне допустиме значення заднього фокального відрізка – 15 мм, осьові товщини лінз – від 4 мм до 6 мм, мінімальну допустиму товщину лінз на краю – 2 мм та максимальне прийнятне значення відносної дисторсії – 1%.

В даному дослідженні через відносно невеликі кути поля зору апертурна діафрагма встановлювалася всередині оптичної системи, в повітряному проміжку між першою і другою лінзами. З метою забезпечення незмінності значення фокусної відстані об'єктива для визначення радіусу останньої оптичної поверхні об'єктива застосувався регулятор, який контролював значення вихідного кута апертурного променя.

Згенеровані оптичні схеми обраних світлосильних об'єктивів показані на рис. 2.

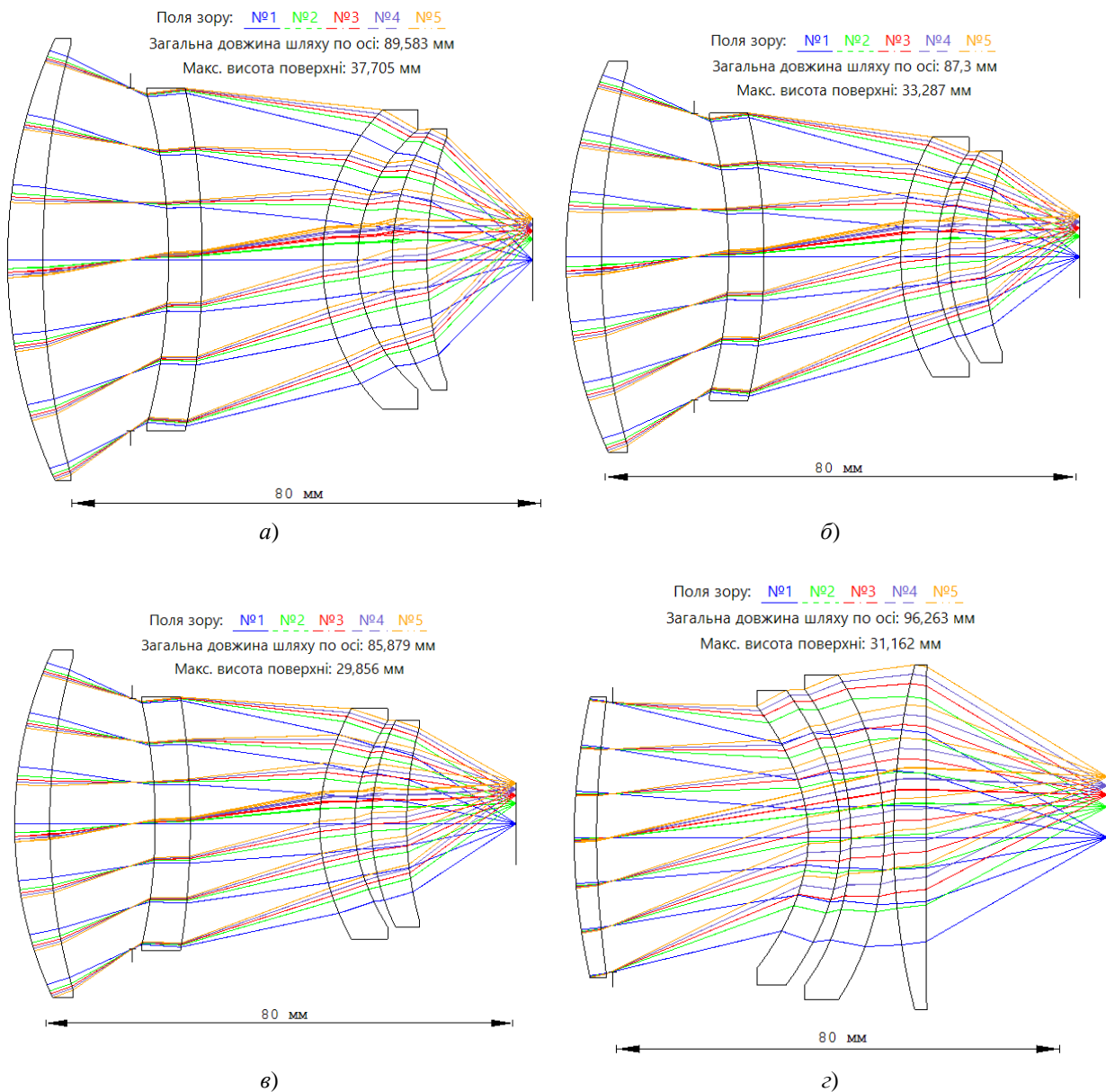
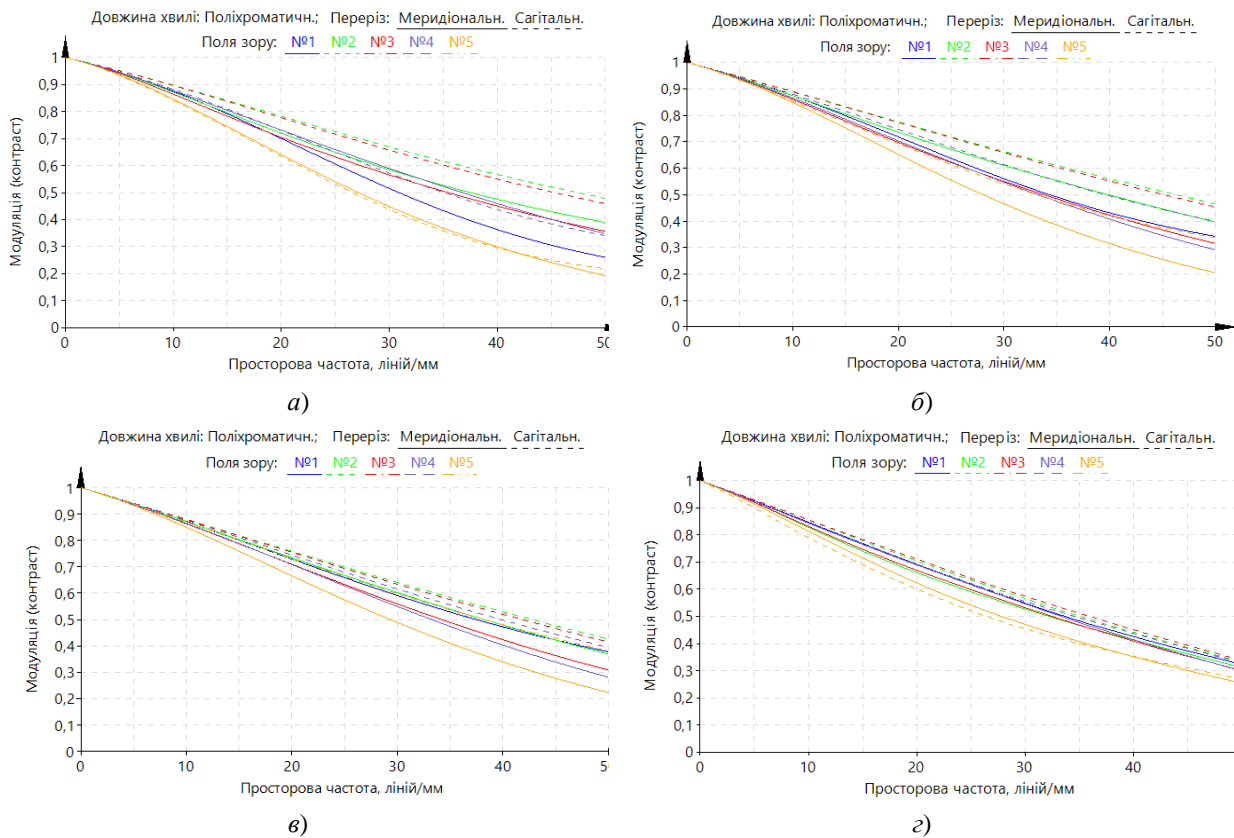


Рис. 2. Оптичних схем згенерованих інфрачервоних об'єктивів з фокусною відстанню 50 мм та різним діафрагмовим числом та полем зору: а)  $F/0,65$ ,  $2\omega=16^\circ$ ; б)  $F/0,75$ ,  $2\omega=16^\circ$ ; в)  $F/0,85$ ,  $2\omega=16^\circ$ ; г)  $F/1$ ,  $2\omega=25^\circ$ . Відносні координати точок використаних поля зору: поле №1 – 0,0; поле №2 – 0,5; поле №3 – 0,7; поле №4 – 0,85; поле №5 – 1,0

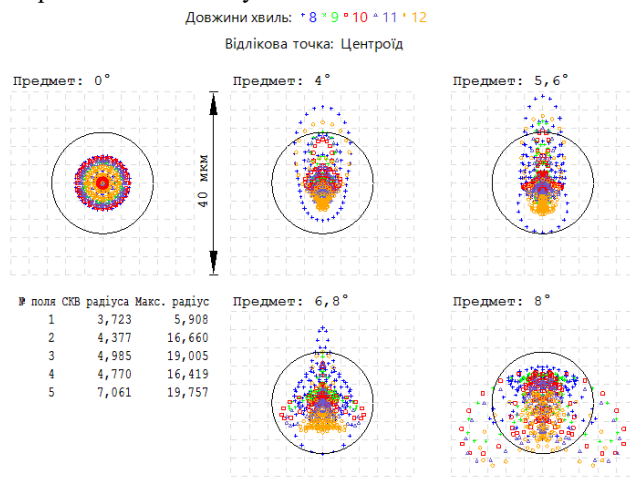


**Рис. 3.** Залежності дифракційних поліхроматичних МФП синтезованих варіантів інфрачервоних об'єктів з фокусною відстанню 50 мм для різних точок поля зору: а) F/0,65, 2ω=16°; б) F/0,75, 2ω=16°; в) F/0,85, 2ω=16°; з) F/1, 2ω=25°. Відносні координати точок використаних поля зору: поле №1 – 0,0; поле №2 – 0,5; поле №3 – 0,7; поле №4 – 0,85; поле №5 – 1,0

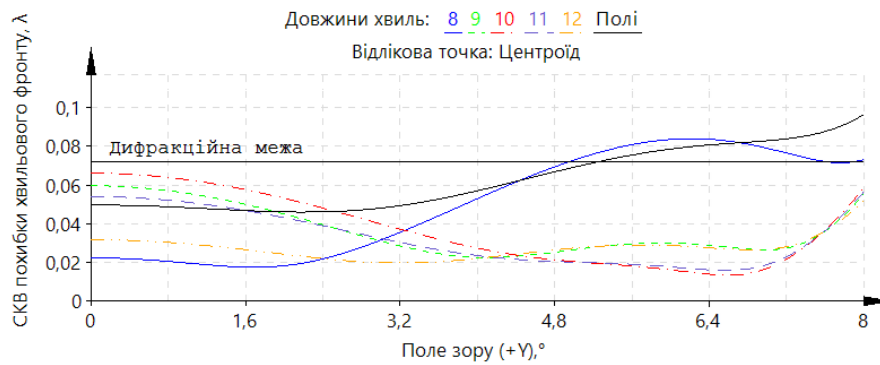
Результати виконаного комп'ютерного моделювання процесу розрахунку свідчать, що алгоритм глобальної оптимізації з кількістю змінних приблизно 50 вимагає значних обчислювальних затрат. Так, для оптимізації значень МФП асферичної оптичної системи та при використанні багатопоточного режиму комп'ютера з процесором Intel Core i9 процедура параметричного синтезу може вимагати від 10 годин та більше.

На рис. 3 представлені залежності дифракційних поліхроматичних МФП розроблених об'єктів для різних предметних точок поля зору (в центрі поля зору, середній зоні поля зору та на краю зображення). Ці графіки характеризують здатність оптичної системи формувати чітке зображення, зокрема, спроможність передавати контраст зображення на низьких, середніх та високих просторових частотах. Представлені на рис. 2 графіки свідчать про досягнуту якісну корекцію аберацій в спектральному діапазоні 8-12 мкм. Зокрема, у всіх представлених оптичних системах значення дифракційних поліхроматичних МФП для просторової частоти 40 ліній/мм є вищими за 40% по всьому полю зору.

Для більш детальної оцінки досягнутого рівня корекції на рис. 4-6 наведені графіки аберацій однієї з отриманих систем (зокрема, системи F/0,85, 2ω=16°). Розраховані точкові діаграми, які характеризують розподіл енергії від точкових джерел в площині зображення, мають середньоквадратичний діаметр плям, що не перевищує діаметр кружка Ейрі. В цілому, представлені графічні залежності свідчать, що в даній системі досягнута відмінна якість зображення по всьому полю.



**Рис. 4.** Точкові діаграми інфрачервоного об'єкта F/0,85, 2ω=16° (колом показаний кружок Ейрі)

Рис. 5. СКВ-похибка відхилення хвильового фронту об'єктива F/0,85,  $2\omega=16^\circ$  як функція кута поляРис. 6. Число Штреля інфрачервоного об'єктива F/0,85,  $2\omega=16^\circ$  як функція кута поля

Максимальне абсолютне (за модулем) значення відносної дисторсії всіх синтезованих об'єктивів не перевищило заданого обмеження в 1%.

### Висновки

Застосована в даній роботі методика параметричного синтезу оптичних систем, в основу якої покладений алгоритм глобальної оптимізації, дозволяє на практиці в автоматизованому режимі отримати якісні оптичні схеми світлосильних об'єктивів для довгохвильового інфрачервоного діапазону з урахуванням технологічних вимог та технічних обмежень, заданих дослідником. Знегеровані зразки чотирилінзових об'єктивів з фокусною відстанню 50 мм та різною світлосилою забезпечують високий рівень корекції як монохроматичних, так і хроматичних аберацій для кутів поля зору  $16^\circ$  і  $25^\circ$  та не мають виньетування периферійних пучків променів. Синтезовані оптичні системи доцільно використовувати в різноманітних тепловізійних оптико-електронних приладах з мікроболометричними матричними приймачами випромінювання, які мають діагональний розмір чутливої площадки 14 та 22 мм. Наступні дослідження можуть бути спрямовані у напрямку пошуку оптичних систем з поліпшеними функціональними параметрами та якістю зображення, в яких використовуються інші матеріали лінз або дифракційні поверхні.

### Література

1. Mann, A. Infrared Optics and Zoom Lenses, Second Edition (Tutorial Texts in Optical Engineering). 2nd Edition. SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2009.
2. Vollmer, M. and Möllmann, K.-P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, 2nd Edition. Wiley-VCH, 2018. 794 p.
3. Колобродов, В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. – 363 с.
4. Hassan H. M., Eldessouky T. A., Medhat M. “Compact athermalized LWIR objective lens”, Journal of Optics, March 2023, <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00892-2>.
5. Umicore’s GASIR® infrared lens 60 mm f/0.95 M34. Technical data sheet [Електронний ресурс]. Umicore Infrared Optics. 2024. / Режим доступу: [eom.umicore.com/en/api/fw/file/0751e2f9ee2d709063e5a5165c38b13fa8197cee/](https://eom.umicore.com/en/api/fw/file/0751e2f9ee2d709063e5a5165c38b13fa8197cee/).
6. SupIR 20 mm f/0.85 Fixed Focus LWIR XGA Imaging Lenses [Електронний ресурс]. Ophir Optonics Solutions Ltd. 2024. / Режим доступу: <https://www.ophiropt.com/en/f/fixe-20mm-f-0.85-lwir-hd-imaging-lens?q=:ranking-desc:isObsolete:false:-excludeCountries:UA:npCategory:1-fov-lwir-lenses:suppress:false:1-fov-lwir-lenses-format:1280x1024:1-fov-lwir-lenses-format:1024x768:1-fov-lwir-lenses-fNumber:0.85>.
7. Kingslake R., Johnson R. B. Lens Design Fundamentals. Second Edition. Elsevier Inc. 2010. 549 p.
8. Velzel C. A Course in Lens Design / William T. Rhodes, Georgia Institute of Technology. 2014. 177 p.
9. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. / H. Gross,

H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger; Edited by Herbert Gross. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2014. – 780 p.

10. Price K., Storn R., Lampinen J. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer Science & Business Media, 2006. 539 p.

11. Xin-She Yang. *Optimization Techniques and Applications with Examples*. John Wiley & Sons, Inc. 2018. 384 p.

12. Slowik A. *Swarm Intelligence Algorithms: Modifications and Applications*. CRC Press. 2020. 378 p.

13. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.252085>.

14. Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М. Автоматизований розрахунок ортоскопічних асферичних дзеркальних об’єктивів Корша для наносупутників // *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*. – 2023. – № 66(2), с. 15-20. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.66\(2\).2023.294934](https://doi.org/10.20535/1970.66(2).2023.294934).

15. 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).

### References

1. Mann, A. *Infrared Optics and Zoom Lenses*, Second Edition (Tutorial Texts in Optical Engineering). 2nd Edition. SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2009.

2. Vollmer, M. and Möllmann, K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, 2nd Edition. Wiley-VCH, 2018. 794 p.

3. Kolobrodov V. G., Lykholit M. I. *Design of thermal and television surveillance systems (in Ukrainian)*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2007. – 363 p.

4. Hassan H. M., Eldessouky T. A., Medhat M. “Compact athermalized LWIR objective lens”, *Journal of Optics*, March 2023, <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00892-2>.

5. Umicore’s GASIR® infrared lens 60 mm f/0.95 M34. Technical data sheet. – Umicore Infrared Optics. 2024. / Source link: [eom.omicore.com/en/api/fw/file/0751e2f9ee2d709063e5a5165c38b13fa8197cee/](https://www.omicore.com/en/api/fw/file/0751e2f9ee2d709063e5a5165c38b13fa8197cee/).

6. SupIR 20 mm f/0.85 Fixed Focus LWIR XGA Imaging Lenses. Ophir Optronics Solutions Ltd. 2024. / Source link: <https://www.ophiropt.com/en/f/fixed-20mm-f-0.85-lwir-hd-imaging-lens?q=:ranking-desc:isObsolete:false:-excludeCountries:UA:npCategory:1-fov-lwir-lenses:suppress:false:1-fov-lwir-lenses-format:1280x1024:1-fov-lwir-lenses-format:1024x768:1-fov-lwir-lenses-fNumber:0.85>.

7. Kingslake R., Johnson R. B. *Lens Design Fundamentals*. Second Edition. Elsevier Inc. 2010. 549 p.

8. Velzel C. *A Course in Lens Design* / William T. Rhodes, Georgia Institute of Technology. 2014. 177 p.

9. *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. / H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger; Edited by Herbert Gross. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2014. – 780 p.

10. Price K., Storn R., Lampinen J. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer Science & Business Media, 2006. 539 p.

11. Xin-She Yang. *Optimization Techniques and Applications with Examples*. John Wiley & Sons, Inc. 2018. 384 p.

12. Slowik A. *Swarm Intelligence Algorithms: Modifications and Applications*. CRC Press. 2020. 378 p.

13. Sokurenko V., Sokurenko O. Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.252085>.

14. Sokurenko V. M., Sokurenko O. M. Automated design of orthoscopic aspherical Korch lenses for nonosatellites (in Ukrainian) // *Visnyk NTUU “KPI”. Seriya pryladobuduvannya*. – 2023. – № 66(2), p. 15-20. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.66\(2\).2023.294934](https://doi.org/10.20535/1970.66(2).2023.294934).

15. 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).