

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ SWIR-ОБ'ЄКТИВА**

Запропоновано здійснювати автоматизований розрахунок оптичної системи об'єктива для короткохвильового інфрачервоного діапазону (short-wave infrared, SWIR) за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференційної еволюції Коші. Завдяки використанню розробленого спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованому режимі виконано експериментальну перевірку дієдатності такого підходу на прикладі розрахунку об'єктива, аналогічного комерційно доступному зразку. Інтервал часу, що потрібен для розробки оптичної системи SWIR-об'єктива з кількістю пошукових параметрів біля 50, не перевищує декількох годин. Результати проведених досліджень свідчать про те, що вище зазначений алгоритм можна вважати ефективним інструментом, який дозволяє виконати автоматизований параметричний синтез та визначити конструктивні параметри оптичної системи з високою якістю зображення.

Ключові слова: автоматизований розрахунок, SWIR, оптична система, об'єктив, глобальна оптимізація, параметричний синтез.

V.M. SOKURENKO, I.O. SMAZHKO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**AUTOMATED OPTICAL SYSTEM DESIGN OF THE SWIR-LENS**

In contrast to the imaging systems operating purely in the visible spectrum, the short-wave infrared (SWIR) systems have serious advantages and can be applied for inspection, quality control of products, surveillance, sorting, etc. In this paper, we propose to perform an automated optical system design of a SWIR-lens with the help of one of modern global optimization algorithms, namely the adaptive Cauchy differential evolution method. At the first stage, a designer should enter the input data, indicate variable parameters, set necessary restrictions, and generate the desired merit function. Then, the global optimization algorithm is launched. The design process itself is fulfilled completely automatically, and there is no need for active participation of the designer. By using the developed specialized software, we performed an experimental validation of this approach on an example of designing a SWIR-lens similar to commercially available one. The time interval required for the design process does not exceed several hours for an optical system having the total number of unknown parameters about 50. The developed optical system of the SWIR-lens has the effective focal length 50 mm, the angular field of view 23°, and F-number 1.4. It is intended to be used in the spectral range 0.9 to 1.7  $\mu\text{m}$  with the main wavelength 1.3  $\mu\text{m}$ . The maximum polychromatic RMS spot radius is smaller than 16  $\mu\text{m}$  over the full field. The relative distortion does not exceed 0.25%. The polychromatic MTF values at the spatial frequency 40 lines/mm are higher than 0.4 across the full field in both the meridional and sagittal cross-sections. The results of the research indicate that the implemented algorithm can be considered to be an effective tool which allows to perform automated parametric synthesis and determine prescription data of the optical system with high image quality.

Keywords: automated optical design, SWIR, optical system, lens, global optimization, parametric synthesis.

**Вступ**

SWIR-випромінювання – це загальноприйнята назва електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,9...1,7 мкм, хоча іноді цей діапазон розширюється до значень 0,7...2,5 мкм [1]. На відміну від середньо- та довгохвильового інфрачервоного випромінювання, SWIR-діапазон є схожим до видимого світла, адже його фотони характерно відбиваються та поглинаються об'єктами та забезпечують значний контраст. Останнє дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю. Крім того, завдяки атмосферному явищу світіння нічного неба, утворюється в п'ять-сім разів більше випромінювання, ніж виключно від зірок. Тому SWIR-камери дозволяють спостерігати об'єкти з великою чіткістю в безмісячні ночі.

З іншої сторони, за допомогою SWIR-випромінювання можна здійснити низку досліджень або вимірювань, які практично неможливо виконати за допомогою видимого світла. Водяна пара, туман та такі речовини як, наприклад, силікон є прозорими у SWIR-діапазоні. Крім того, кольори, які у видимому діапазоні спостерігаються як майже ідентичні, чітко розрізняються в діапазоні SWIR [1].

SWIR-об'єктиви можуть виготовлятися за тими ж технологіями, що використовуються для компонентів видимого діапазону, адже оптичне скло є прозорим для довжин хвиль 0,9...1,7 мкм. Це знижує витрати на їх виробництво та робить можливим використання різних фільтрів та вікон в рамках однієї системи [2].

Оскільки SWIR-сенсори та камери переходять у фазу швидкого розвитку, постає необхідність розробки якісних інфрачервоних об'єктивів з високою роздільною здатністю та малими значеннями монохроматичних і хроматичних аберацій.

**Огляд методів проектування оптичних систем**

Для абераційного розрахунку оптичних систем поширеним є метод, що базується на основі теорії аберацій 3-го та 5-го порядків [3]. Інший підхід зводиться до використання методу локальної оптимізації. За своєю суттю, алгоритми локальної оптимізації поліпшують поточний розв'язок шляхом здійснення відносно невеликих локальних змін. Для цього, зазвичай, на кожному кроці розраховуються перші та другі похідні. Ітераційний процес продовжується до тих пір, поки він не зійдеться до оптимального розв'язку або поки не буде вичерпано певний ліміт часу чи кількості спроб. В цілому, зазначені підходи виявилися ефективними для розв'язання ряду багатовимірних задач. Зокрема, їх часто застосовують для розробки оптичних систем

різноманітного призначення. Проте, незважаючи на вказані позитивні сторони, розглянуті «класичні» методи мають ряд недоліків, головними з яких є обмеженість розв'язку аберациями нижчих порядків або потреба в якісній стартовій оптичній системі. Тому й виникла необхідність в «універсальному» підході, який не потребував би якісної вихідної системи та досвіду висококваліфікованого розробника.

Велику низку різнопланових та багатовимірних задач, які розв'язати аналітично неможливо, допомагає вирішити глобальна оптимізація (ГО) – галузь прикладної математики та числового аналізу. Результат дії ГО – знаходження найкращого елемента з багатовимірної множини можливих елементів, що задовольняє заданому критерію. Як правило, такі критерії представляються математичними функціями та мають назву цільових (або оціночних) функцій. За останні роки розроблено значну кількість алгоритмів ГО як детермінованих, так і стохастичних. Серед останніх поширення набули алгоритми випадкового пошуку, імітаційного відпалу, а також різні еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми, методи еволюційної стратегії, методи диференційної еволюції тощо) [4–6].

#### Постановка задачі

Метою даної роботи є перевірка (шляхом комп'ютерного моделювання) результативності та ефективності автоматизованого параметричного абераційного синтезу оптичної системи SWIR-об'єктива засобами глобальної оптимізації.

Для синтезу оптичної системи об'єктива в даній роботі пропонується використовувати один із сучасних методів ГО – адаптивний метод диференційної еволюції Коші [7, 8]. Особливістю цього методу є те, що кожен змінний пошуковий параметр має свої значення характерних числових параметрів диференційної еволюції. Сутність такого підходу зводиться до того, що на кожній новій ітерації алгоритму його параметри визначаються на основі середніх значень показників, отриманих під час попередніх ітерацій. Фактично розглянуті параметри адаптуються до реальної оціночної функції. Відмінністю цього методу є також те, що нові значення показників генеруються на основі розподілу Коші, який дозволяє отримувати випадкові значення з більшим відхиленням від середніх значень, в порівнянні з гаусоподібним (нормальним) розподілом.

Розроблена комп'ютерна програма з реалізованим у ній вищезазначеним алгоритмом дозволяє в автоматичному режимі визначити конструктивні параметри оптичної системи. Переважно до них належать радіуси кривизни поверхонь, осьові товщини лінз, осьові повітряні проміжки та параметри оптичних середовищ. В більш складних випадках як параметри оптимізації можуть використовуватися коефіцієнти асферичності та специфічні параметри оптичних поверхонь та середовищ (різноманітних дифракційних ґраток, градієнтних середовищ тощо) [9–13].

#### Запропонований підхід

Перед розв'язанням поставленої задачі параметричного синтезу оптичної системи розробнику спочатку необхідно визначитися з типом системи, кількістю лінз та основними функціональними параметрами системи (полем зору, типом апертури, відносним отвір тощо).

Далі мають бути вибрані параметри оптимізації та сформована оціночна функція. Зазвичай, базова «стандартна» оціночна функція – це функція мінімізації середньоквадратичних розмірів світлових плям на поверхні зображень для всіх заданих пучків (тобто точок поля зору). Альтернативно може бути застосована функція мінімізації деформацій хвильового фронту для всіх заданих пучків. Як правило, оціночна функція містить також складові елементи для контролю діапазонів допустимих значень параметрів та обмежень, необхідних для отримання системи, яку можна фізично реалізувати. Для спрощення задання оціночної функції її складові елементи генеруються автоматично засобами розробленого програмного забезпечення. Додатково конструктором можуть задаватися бажані або граничні значення для функціональних та конструктивних параметрів системи, її аберацій, параметрів довільних променів тощо.

Обравши параметрами оптимізації (радіуси змінних поверхонь, повітряні проміжки, осьові товщини лінз та ін.), конструктор має ввести для них допустимі діапазони та практично довільні стартові значення.

Встановлення регулятора вихідного кута апертурного променя на останній оптичній поверхні об'єктива дозволяє забезпечити бажане фіксоване значення задньої фокусної відстані системи. У разі потреби є можливість обмежити довжину оптичної системи вздовж осі, задати максимально допустиме значення дисторсії, граничне значення кута головного променя похилого пучка в просторі зображень (для забезпечення телецентричності вихідних пучків) тощо.

Наступний етап – безпосереднього розрахунку – є найбільш тривалим, адже він передбачає автоматичну процедуру глобальної оптимізації за одним із закладених у програму алгоритмів. Цей процес є повністю автоматичним та не потребує активної участі конструктора.

Після завершення процедури глобальної оптимізації оптична система набуває практично кінцевого вигляду, однак за необхідності з метою остаточного «доведення» системи або скорочення тривалості розрахунків можна скористатися локальною оптимізацією.

#### Приклад параметричного синтезу

Як приклад для розрахунку було обрано об'єктив «OB-SWIR 50» з каталогу компанії Ortes [14]. Його оптична система має фокусну відстань 50 мм, кутове поле зору 23°, діафрагмове число F/1.4. Об'єктив призначений для роботи у спектральному діапазоні 0,9...1,7 мкм з основною довжиною хвилі 1,3 мкм.

Під час параметричного синтезу об'єктива з ідентичними параметрами було встановлено обмеження на мінімальну та максимальну осьові товщини – 1 мм і 7 мм відповідно, мінімальну товщину на краю – 2 мм та максимальне допустиме значення дисторсії – 0,5%.

Оптична схема отриманого об'єктива представлена на рис. 1.

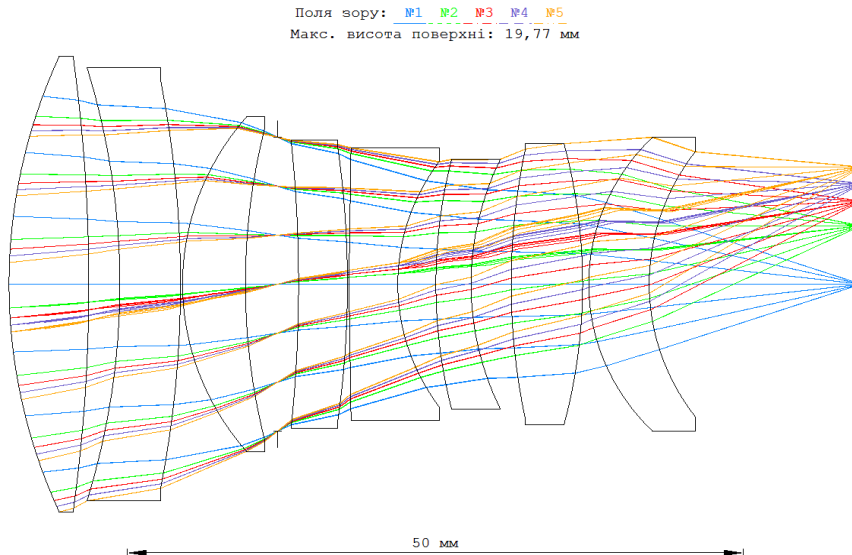


Рис. 1. Оптична схема з ходом променів розробленого об'єктива для SWIR діапазону

Як видно з рис. 2, максимальне значення середньоквадратичних радіусів світлових плям в поліхроматичному світлі не перевищує 16 мкм.

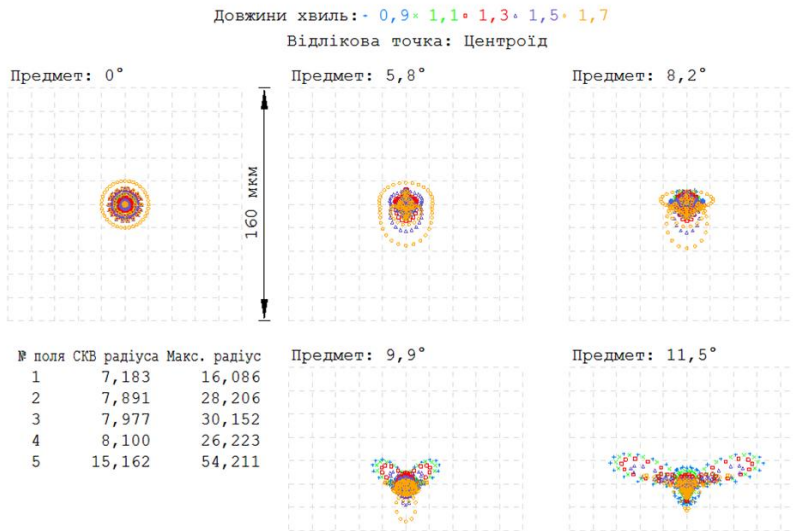


Рис. 2. Точкові діаграми розробленого об'єктива для SWIR-діапазону

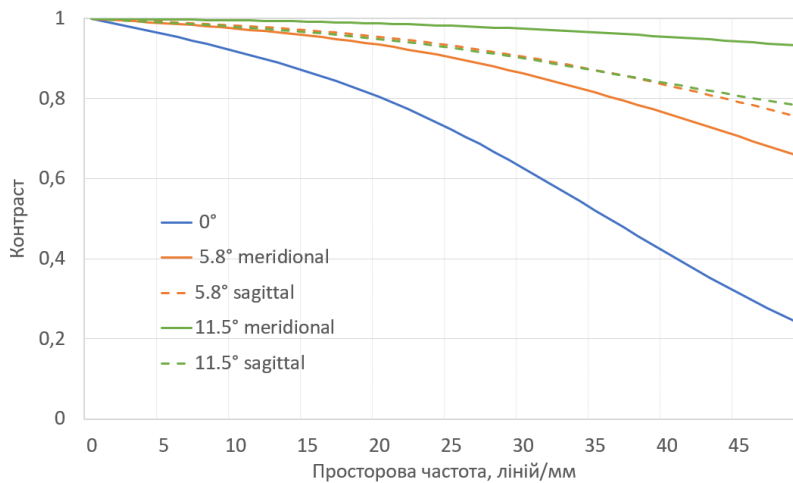


Рис. 3. Поліхроматичні модуляційні передавальні функції розробленого SWIR-об'єктива для різних точок поля зору

Представлені на рис. 3 графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій (МПФ) розробленого об'єктива для різних точок поля зору (в центрі, середній зоні та на периферії зображення) свідчать про якісну корекцію аберацій. Зокрема, значення поліхроматичних МПФ для просторової частоти 40 ліній/мм по всьому полю в меридіональному та сагітальному перетинах перевищують 40%.

**Висновки**

Шляхом комп'ютерного моделювання здійснено експериментальну перевірку дієздатності запропонованого автоматизованого методу розрахунку оптичних систем на прикладі розробки SWIR-об'єктива. Отримані результати свідчать, що розрахована оптична система за якістю зображення не поступається відомому комерційному аналогу. Підтверджено, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші є потужним засобом, за допомогою якого можна результативним чином здійснювати параметричний синтез оптичних систем SWIR-об'єктивів з параметрами, що задовольнятимуть заданим конструктором вимогам.

**Література**

1. Птицын А. Что мы видим и что не видим? / А. Птицын // Фотоника. – 2015. – № 3. – С. 142–151.
2. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2016. Т. 9987. Р. 99870С.
3. Gross H., Zügge H., Peschka M., Blechinger F. *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
4. Eiben A., Smith J. *Introduction to Evolutionary Computing*; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
5. Haupt R., Haupt S. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.
6. Сокуренько В. М. Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації / В. М. Сокуренько, В. С. Неділюк // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012. – № 1. – С. 81–88.
7. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 p. DOI 10.1155/2013/969734
8. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. *Journal of Computers*. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139-2145. DOI 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
9. Сокуренько В. М. Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації / В. М. Сокуренько, Я. І. Макаренко // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2015. – № 50(2) – С. 51–60.
10. Сокуренько В. М. Застосування адаптивного методу диференційної еволюції Коші для розрахунку об'єктивів / В. М. Сокуренько, І. С. Буйлов // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2016. – № 51(1) – С. 41–47.
11. Сокуренько В. М. Розробка об'єктивів з виправленою дисторсією / В. М. Сокуренько, О. Є. Стріха // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 99–105.
12. Сокуренько В. М. Автоматизований розрахунок окулярів з дифракційними оптичними елементами / В. М. Сокуренько, М. М. Вакулєнко // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 1 (257). – С. 107–112.
13. Сокуренько В. М. Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива зі зменшеною дисторсією / В. М. Сокуренько, Д. П. Бондарчук // Вісник НТУУ "КПІ". – 2018. – № 56(2) – С. 18–24.
14. SWIR catalog 2018 [Електронний ресурс] // Optec S.P.A. company. – 2019. – Режим доступу : [http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo\\_completo.pdf](http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo_completo.pdf).

**References**

1. Ptiцыn A. Chto my vidim i chto ne vidim? / A. Ptiцыn // Fotonika. – 2015. – № 3. – S. 142–151.
2. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2016. Т. 9987. R. 99870С.
3. Gross H., Zügge H., Peschka M., Blechinger F. *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
4. Eiben A., Smith J. *Introduction to Evolutionary Computing*; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
5. Haupt R., Haupt S. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.
6. Sokurenko V. M. Chyslove doslidzhennia stokhastychnykh metodiv bezpererвної hlobalnoi optymizatsii / V. M. Sokurenko, V. S. Nediliuk // Naukovi visti Natsionalnoho univertsytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». – 2012. – № 1. – S. 81–88.
7. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 pages. DOI 10.1155/2013/969734
8. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. *Journal of Computers*. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139-2145. DOI 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
9. Sokurenko V. M. Rozrobka optychnykh system metodamy hlobalnoi optymizatsii / V. M. Sokurenko, Ya. I. Makarenko // Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. – 2015. – № 50(2) – S. 51–60.
10. Sokurenko V. M. Zastosuvannia adaptynoho metodu dyferentsiinoi evoliutsii Koshi dlia rozrakhunku obiektyviv / V. M. Sokurenko, I. S. Builov // Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. – 2016. – № 51(1) – S. 41–47.
11. Sokurenko V. M. Rozrobka obiektyviv z vypravlenoiu dystorsiei / V. M. Sokurenko, O. Ye. Strikha // Visnyk Vynnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2017. – № 1. – S. 99–105.
12. Sokurenko V. M. Avtomatyzovanyi rozrakhunok okuliariv z dyfraktsiinyomy optychnymy elementamy / V. M. Sokurenko, M. M. Vakulenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho univertsytetu: Tekhnichni nauky. – Khmelnytskiy, 2018. – № 1 (257). – S. 107–112.
13. Sokurenko V. M. Avtomatyzovanyi parametrychniy syntez fotoobiektyva zi zmsheanoi dystorsiei / V. M. Sokurenko, D. P. Bondarchuk // Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. – 2018. – № 56(2) – S. 18–24.
14. SWIR catalog 2018 [Elektronnyi resurs] // Optec S.P.A. company. – 2019. – Rezhym dostupu : [http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo\\_completo.pdf](http://www.optec.eu/pdf/ob-swir/catalogo_completo.pdf).

Рецензія/Peer review : 14.12.2019 p.

Надрукована/Printed : 16.01.2020

Рецензент: к.т.н., доц. Кучеренко О.К.