

опосередовано, змінюючи параметри, входящие в вираження для модуляційних передаточних функцій більшості звеньев, участвующих в формировании изображения.

Ключевые слова: изображение, экспозиция, динамический диапазон.

D. O. Pivtorak

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

SPATIALLY-FREQUENCY MODEL OF IMAGING PROCESS BY MULTIFUNCTION METHOD

When photographing of objects with large range of brightness, some information may be lost. The main reasons for the loss of information when photographing these objects are insufficient dynamic range of the input signal to the dynamic range of the image detector. To reduce loss of the information when photographing in a large range of brightness within a frame used multiplicative, additive and multifunction methods of image registration are used.

If multifunction method of image registration is used exposing the photosensitive sensor through pre-built frequency selective filter-mask of optical image of the photographing object and images of uniform brightness screen is carried out.

Spatially-frequency model of imaging process in digital photocaleras that use the multifunction method of local exposure control is developed. From a model evidently, that the exposure system of local exposure control directly influences on the imaging process, changing the modulation transmission function, and mediated, changing parameters, that is included in expressions for the modulation transmission functions of most links that take part in forming of this image.

Key words: image, exposure, dynamic range.

*Надійшла до редакції
27 січня 2016 року*

*Рецензовано
10 лютого 2016 року*

© Півторак Д. О., 2016

УДК 681.7.067

ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ КОШІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОБ'ЄКТИВІВ

Сокурєнко В. М., Буйлов І. С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

E-mail: sokurenko2@meta.ua, enekotrade@gmail.com

Автоматизований розрахунок оптичних систем об'єктивів потребує застосування відповідного програмного забезпечення. В основу такого спеціалізованого програмного забезпечення можуть бути покладені сучасні алгоритми глобальної оптимізації. В даній роботі чисельним моделюванням досліджується нещодавно опублікований адаптивний метод диференційної еволюції Коші, який вирізняється наявністю внутрішнього механізму адаптації двох параметрів-коефіцієнтів класичного методу диференційної еволюції та застосуванням розподілу Коші для генерування нових значень цих коефіцієнтів. Отримані результати підтверджують те, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші дозволяє синтезувати довільну оптичну систему з заданими функціональними параметрами та прийнятним рівнем корекції монохроматичних та хроматичних аберацій. Продуктивність синтезу оптичної системи значно залежить від структури сформованої оціночної функції. Час, який потрібен для здійснення автоматизованого розрахунку оптичної системи з кількістю пошукових параметрів біля 20, не перевищує декілька годин. Якість зображення отриманих систем дозволяє використовувати їх з існуючими матричними приймачами випромінювання.

Ключові слова: *об'єктив, оптична система, адаптивний метод диференційної еволюції Коші, автоматизований розрахунок, глобальна оптимізація.*

Вступ

Сучасні чисельні методи автоматизованого проектування оптичних систем (ОС) мають багато переваг перед аналітичними методами, адже дозволяють ефективно розв'язувати задачі проектування ОС різноманітного призначення. Зокрема, успіхи в комп'ютерній науці та обчислювальній математиці призвели до удосконалення вже відомих алгоритмів як локальної, так і глобальної оптимізації ОС [1-3].

Основними перешкодами, які потрібно подолати під час автоматизованого проектування ОС, є наявність багатьох локальних мінімумів в багатомірному просторі розв'язків [4, 5] та суттєві затрати часу.

Незважаючи на ці перешкоди, запропоновані та/або модифіковані в останні роки варіанти алгоритмів глобальної оптимізації дозволяють достатньо швидко отримувати високоякісні ОС в автоматизованому режимі.

Представлені в даній роботі дослідження підтверджують, що застосування сучасних алгоритмів оптимізації, є перспективним напрямком розробки нових ОС в сучасній оптичній інженерії.

Постановка задачі

Метою даної роботи є перевірка ефективності запропонованого нещодавно адаптивного методу диференційної еволюції Коші (ACDE) під час автоматизованого розрахунку лінзових об'єктів [6, 7]. Диференційна еволюція представляє собою багатовимірну математичну оптимізацію, а її алгоритм належить до класу стохастичних еволюційних методів та використовує окремі ідеї генетичних алгоритмів [8-10]. Особливістю удосконаленого методу Коші є те, що на кожній новій ітерації параметри методу адаптуються на основі середніх значень показників [6].

В рамках проведення досліджень було удосконалено власне програмне забезпечення розрахунку ОС в напрямку розширення функціональних можливостей з глобальної оптимізації. Під час глобальної оптимізації

програма автоматично визначає товщини лінз, осеві повітряні проміжки та радіуси кривизни. Алгоритми глобальної оптимізації, реалізовані в програмному забезпеченні, гарантовано дотримують задані користувачем граничні умови (зокрема, діапазони на конструктивні параметри, фіксоване значення задньої фокусної відстані, максимальне значення осевої довжини системи тощо).

Вибір відомих оптичних систем об'єктів з патентних джерел

В даній роботі проведена перевірка працездатності та ефективності адаптивного методу Коші на прикладі розрахунку ОС двох лінзових об'єктів. Параметрами оптимізації ОС обиралися радіуси кривизни поверхонь та осеві відстані. Остання сферична поверхня об'єктива використовувалася для контролю задньої фокусної відстані всієї системи (завданням фіксованого значення кута вихідного апертурного променя).

Як перший приклад було обрано ОС об'єктива з патенту US 7924510 B2 компанії Kobayashi Hiroaki Fujinon Corporation [11] (рис. 1, табл. 1). Представлений в патенті об'єктив містить чотири групи лінз, а загальна кількість компонентів дорівнює шести. Перша група лінз містить одну двоввігнуту лінзу, друга група – дві двовипуклі лінзи, розташовані випуклими поверхнями одна до одної, третя група – лише одну двоввігнуту лінзу, а четверта – дві двовипуклі лінзи, розташовані випуклими поверхнями одна до одної.

Як другий приклад було обрано ОС об'єктива з патенту US 9013806 B2 Daiki Kawamura FUJIFILM Corporation [12] (рис. 2, табл. 2). Об'єктив містить дві групи лінз, а загальна кількість компонентів дорівнює шести. Перша група лінз представляє собою склейку з двох лінз: від'ємного меніску з випуклими поверхнями, оберненими до простору предметів, та позитивної лінзи. Друга група лінз містить склейку позитивної та від'ємної лінз, від'ємний меніск та двовипуклу лінзу.

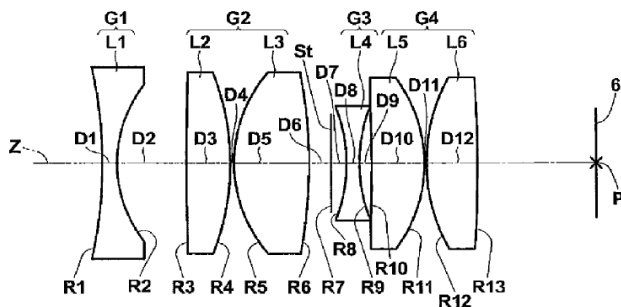


Рис. 1. Оптична схема об'єктива з патенту [11]

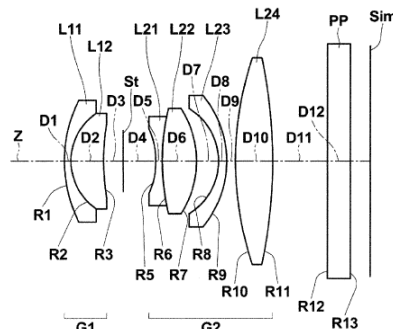


Рис. 2. Оптична схема об'єктива з патенту [12]

Таблиця 1. Числові значення аберацій об'єктива з патенту [11]

Тип аберації	Значення аберації
Значення СКВ в широкому спектральному діапазоні:	
- для поля №1 (на оптичній осі)	6,4 мкм
- для поля №2 (під кутом 19,3°)	9,6 мкм
- для поля №3 (на периферії, під кутом 27,3°)	14,8 мкм
Дисторсія на краю поля зору $W=27,3^\circ$	9 %

Таблиця 2. Числові значення аберацій об'єктива з патенту [12]

Тип аберації	Значення аберації
Значення СКВ в широкому спектральному діапазоні:	
- для поля №1 (на оптичній осі)	26,21 мкм
- для поля №2 (під кутом 18,7°)	36,05 мкм
- для поля №3 (на периферії, під кутом 26,5°)	61,46 мкм
Дисторсія на краю поля зору $W=26,5^\circ$	4 %

Загальна послідовність автоматизованого розрахунку

Для розв'язання поставленої задачі в даній роботі пропонується підхід, який передбачає виконання чотирьох етапів.

Спочатку програму необхідно ввести загальну структуру оптичної системи: приблизні (фактично довільні) значення радіусів поверхонь, товщин лінз та повітряних проміжків, марки скла, що вибираються з обраних каталогів, а також такі системні параметри як апертуру, точки поля зору, довжини хвиль тощо.

На другому етапі конструктор повинен обрати параметри оптимізації та сформувати оціночну функцію. Критерієм якості ОС може слугувати функція мінімізації середньоквадратичного радіуса плям розсіювання, при цьому певні точки поля зору та довжини хвиль можуть мати свої специфічні вагові коефіцієнти. На цьому етапі конструктор має можливість встановити раціональні діапазони на кривизни поверхонь лінз, повітряні проміжки, осьові товщини лінз, допустимі товщини лінз на краю з урахуванням мінімальних допусків для подальшого закріплення та при необхідності – бажані значення фокусної відстані, максимальної осьової товщини ОС та інші вимоги (обмеження).

Третій етап є найтривалішим, бо саме він передбачає процедуру глобальної оптимізації за обраним алгоритмом. Як зазначалося вище, в даній роботі досліджується адаптивний метод диференційної еволюції Коші. Автори праці [6] запропонували на кожній новій ітерації здійснювати адаптацію двох параметрів методу диференційної еволюції, а саме масштабного коефіцієнта F (scaling factor) та коефіцієнта CR (crossover rate), причому для кожної точки (індивідуума) незалежно. Така адаптація (коригування) проводиться на основі значень коефіцієнтів F і CR , усереднених серед всіх

успішних індивідуумів. Нові значення цих коефіцієнтів для кожної точки генеруються як випадкові величини з розрахованими середніми значеннями та можливими відхиленнями відповідно до розподілу Коші. Застосування такого розподілу, що характеризується подовженим “хвостом”, на практиці призводить до більш швидкого пошуку оптимуму під час розв'язання різноманітних задач з унімодальним та багатомодальним характером оціночної функції в порівнянні з іншими сучасними алгоритмами диференційної еволюції [6].

Нарешті, на четвертому етапі автоматизованого розрахунку ОС для кінцевого «доведення» параметрів системи доцільно скористатися засобами локальної оптимізації.

Результати автоматизованого розрахунку

Для параметричного синтезу ОС першого об'єктива було задано такі вхідні параметри: кутове поле зору в просторі предметів 54,6°; відносний отвір 1:1,5; задня фокусна відстань 5,7 мм; спектральний діапазон 0,48...0,65 мкм (основна довжина хвилі – 0,58 мкм); максимальна довжина системи 17,66 мм.

Загальна кількість пошукових параметрів дорівнювала 20. На рис. 3 представлена оптична схема розробленого об'єктива, а в табл. 3 – його конструктивні параметри. Практика показує, що навіть на комп'ютерах з помірними характеристиками вся процедура автоматизованого проектування ОС з кількістю змінних до 20 потребує декілька годин для пошуку ОС.

Для оцінки якості зображення на рис. 4 представлені точкові діаграми розробленого лінзового об'єктива №1, отримані в широкому спектральному діапазоні для трьох довжин хвиль та трьох точок поля зору. Як видно, розроблена ОС є виправленою для заданих довжин хвиль та збалансованою по полю зору.

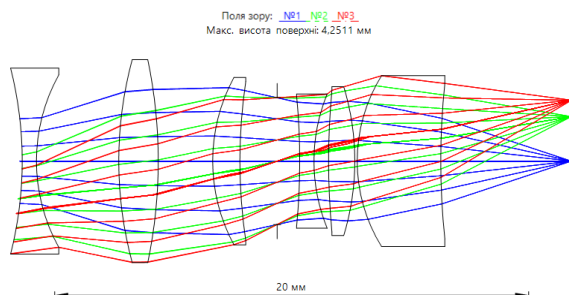


Рис. 3. Оптична схема отриманої ОС об'єктива №1 з ходом променів

Дисторсія розрахованого об'єктива не перевищує 9%. Середньоквадратична похибка хвильового фронту отриманого об'єктива як функція поля представлена на рис. 6.

Параметричний синтез ОС другого об'єктива проводився з такими параметрами: кутове поле зору в просторі предметів 53° ; відносний отвір 1:2,8; спектральний діапазон 0,46...0,655 мкм (основна довжина хвилі: 0,58 мкм); максимальна довжина системи 38,2 мм; діаметр апертурної діафрагми 10 мм; задня фокусна відстань 28,8 мм.

Таблиця 3. Конструктивні параметри розробленої ОС об'єктива №1

Номер поверхні	Радіус, мм	Товщина, мм	Показник заломлення n_e та коефіцієнт дисперсії v_e	Світловий радіус, мм
Предмет	∞	∞		
1	-15,694	0,60	1,773; 49,60	3,89
2	7,394	3,47		3,61
3	16,216	1,66	1,801; 35,00	4,25
4	-20,619	2,29		4,24
5	7,310	1,14	1,755; 52,30	3,50
6	22,530	1,57		3,33
7 (апертурна діафрагма)	∞	0,95		2,65
8	-28,252	0,60	1,923; 18,90	2,71
9	7,380	0,61		2,81
10	31,549	1,1	1,835; 42,70	2,96
11	-10,612	0,1		3,11
12	6,749	3,5	1,755; 52,30	3,58
13	30,579	5,5		3,26
Зображення	∞	0,0		2,55

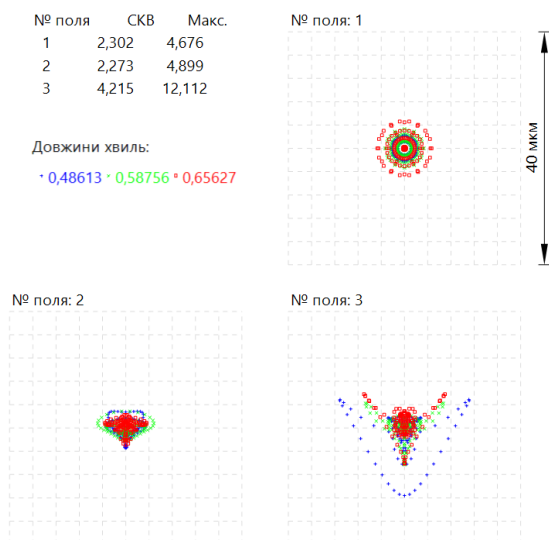


Рис. 4. Точкові діаграми отриманої ОС об'єктива №1 в широкому спектральному діапазоні (поле №1 – на оптичній осі; поле №2 – під кутом $19,3^\circ$; поле №3 – на периферії, під кутом $27,3^\circ$)

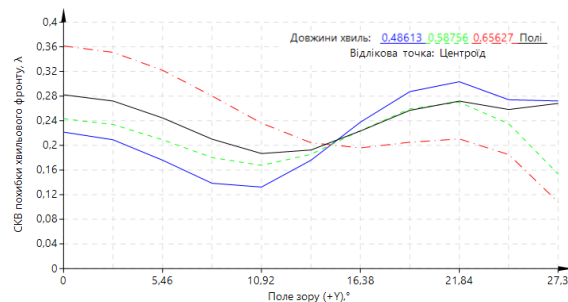


Рис. 5. Залежність середньоквадратичної похибки хвильового фронту розрахованого об'єктива №1 від поля

Загальна кількість пошукових параметрів дорівнювала 19. Оптична схема розробленого об'єктива представлена на рис. 6, а його конструктивні параметри – в табл. 4.

На рис. 7 і 8 представлені точкові діаграми системи та залежність середньоквадратичної похибки хвильового фронту від поля, за допомогою яких можна оцінити якість зображення.

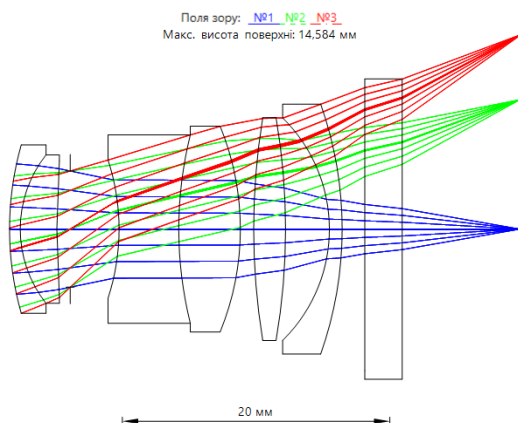


Рис. 6. Оптична схема отриманої ОС об'єктива №2 з ходом променів

Розроблена ОС за якістю зображення не поступається прототипу. Дисторсія об'єктива №2 не перевищує 4%.

Висновки

В даній роботі було здійснено розробку двох оптичних систем (ОС) лінзових об'єктивів, яка проводилася в автоматичному режимі. З результатів розрахунку розроблених систем видно, що вони не поступаються відомим аналогам-прототипам. Отримані результати свідчать, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші є потужним засобом, за допомогою якого можна здійснювати параметричний синтез оптичних систем.

Таблиця 4. Конструктивні параметри розробленої ОС об'єктива №2

Номер поверхні	Радіус, мм	Товщина, мм	Показник заломлення n_e та коефіцієнт дисперсії \square_e	Світловий радіус, мм
Предмет	∞	∞		
1	23,250	0,80	1,689; 31,07	6,32
2	9,014	2,74	1,883; 40,76	5,57
3	70,235	1,00		5,13
4 (апертурна діафрагма)		3,64		4,36
5	-16,714	4,46	1,847; 23,78	5,18
6	29,464	4,59	1,904; 31,32	7,07
7	-20,511	1,00		7,71
8	51,786	2,38	1,623; 58,16	8,31
9	-49,554	3,27		8,35
10	-11,733	0,95	1,713; 53,87	8,34
11	-28,199	1,69		9,38
12	∞	2,80	1,550; 55,00	10,61
13	∞	8,82		11,27
Зображення	∞	0,0		14,58

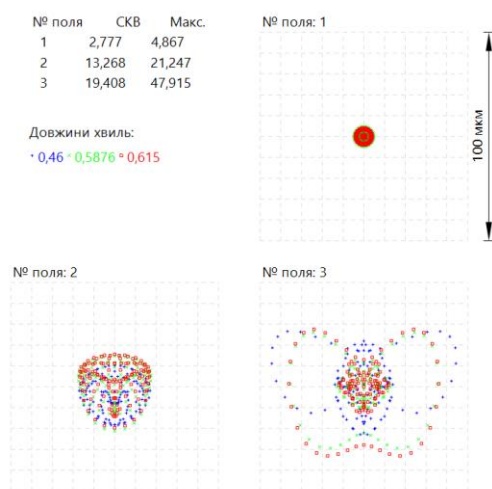


Рис. 7. Точкові діаграми отриманої ОС об'єктива №2 в широкому спектральному діапазоні (поле №1 – на оптичній осі; поле №2 – під кутом 18,73°; поле №3 – на периферії, під кутом 26,5°)

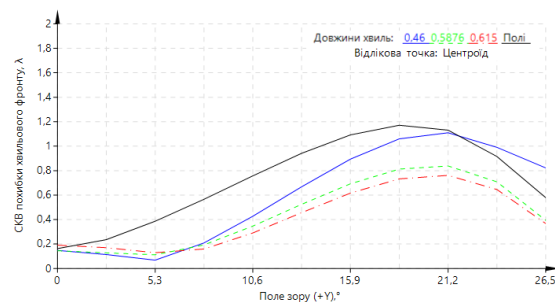


Рис. 8. Залежність середньоквадратичної похибки хвильового фронту розрахованого об'єктива №2 від поля

Процес автоматизованого проектування ОС з кількістю пошукових параметрів біля 20 потребує лише декілька годин для проведення розрахунків. З розвитком алгоритмів та збільшенням обчислювальної потужності комп'ютерної техніки цей час буде лише скорочуватися.

Наступні дослідження раціонально направити на пошук та застосування удосконалених методів глобальної оптимізації, адже дієздатність та результативність таких методів підтверджується на практиці під час проектування ОС довільного призначення.

Література

1. John R. Koza, Lee W. Jones. Automated Re-Invention of Six Patented Optical Lens Systems using Genetic Programming Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO-2005, 2005. pp. 1953-1960.
2. S. Thibault, Ch. Gagne, J. Beaulieu, and M. Parizeau. Evolutionary Algorithms Applied to Lens Design: Case Study and Analysis, Proc. of the SPIE International Symposium on Optical Systems Design (EOD 2005), Jena, Germany, September 12-16, 2005. pp. 5962-5968.
3. S. Pal. Aberration correction of zoom lenses using evolutionary programming. Applied Optics. Vol. 52, 2013. pp. 5424-7732.
4. F. Bociort. Why are there so many system shapes in lens design? Proc. SPIE, Vol. 7849, 78490D, 2010.
5. Van Turnhout M., Van Grol P., Bociort F., Urbach HP. Obtaining new local minima in lens design by constructing saddle points. Optical Express. Vol. 23(5), 2015. pp. 6679-6691.
6. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. The Scientific World Journal, Vol. 2013, 2013. 12 pages.
7. Choi T. J., Ahn C. W. An Adaptive Cauchy Differential Evolution Algorithm with Bias Strategy Adaptation Mechanism for Global Numerical Optimization. Journal of Computers, Vol. 9, No 9, 2014. pp. 2139-2145.
8. Ali M., Zabinsky B. A Numerical Evaluation of Several Stochastic Algorithms on Selected Continuous Global Optimization Test Problems. Journal of Global Optimization. Vol. 31, 2005. pp. 635-672.
9. Kumar P., Pant M., and Singh V. P. Two Self-Adaptive Variants of Differential Evolution Algorithm for Global Optimization. International Journal of Applied Mathematics and Mechacnics, Vol. 8, No. 3, 2012. pp. 22-34.
10. Haupt R. and Haupt S. Practical Genetic Algorithms. 2004. 253 p.
11. Patent US 7924510 B2. Imaging lens and imaging apparatus equipped with the imaging lens. Kobayashi Hiroaki. Filed: May 15, 2008. Publication Date: Nov. 20, 2008.
12. Patent US 9013806 B2. Imaging lens and imaging apparatus. Daiki Kawamura. Filed: Jun. 27, 2014. Publication Date: Oct. 16, 2014.

УДК 681.7.067

В. М. Сокуренько, І. С. Буйлов

Национальний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», г. Київ, Україна

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОШИ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ

Автоматизированный расчет оптических систем объективов требует применения соответствующего программного обеспечения. В основу такого специализированного программного обеспечения могут быть положены современные алгоритмы глобальной оптимизации. В данной работе численным моделированием исследуется адаптивный метод дифференциальной эволюции Коши, который отличается наличием внутреннего механизма адаптации двух параметров-коэффициентов классического метода дифференциальной эволюции и применением распределения Коши для генерирования новых значений этих коэффициентов. Полученные результаты подтверждают то, что адаптивный метод дифференциальной эволюции Коши позволяет синтезировать произвольную оптическую систему с заданными функциональными параметрами и приемлемым уровнем коррекции монохроматических и хроматических аберраций. Производительность синтеза оптической системы значительно зависит от структуры сформированной оценочной функции. Время, необходимое для осуществления автоматизированного расчета оптической системы с количеством поисковых параметров около 20, не превышает нескольких часов. Качество изображения полученных систем позволяет использовать их с существующими матричными приемниками излучения.

Ключевые слова: объектив, оптическая система, адаптивный метод дифференциальной эволюции Коши, автоматизированный расчет, глобальная оптимизация.

V. Sokurenko, I. Builov

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

APPLYING ADAPTIVE CAUCHY DIFFERENTIAL EVOLUTION FOR LENS DESIGN

For automated design of optical lens systems, the appropriate software is to be used. To provide a design process, modern algorithms of global optimization can be incorporated into such specialized software. In this paper, a recently published adaptive Cauchy differential evolution method is numerically studied for the purpose of lens design. This method is characterized by an availability of an internal mechanism for adapting two specific parameters (coefficients) of the classical differential evolution method, as well as by applying the Cauchy distribution to generate new values of these parameters. The obtained results confirm that the adaptive Cauchy differential evolution method enables to design an arbitrary optical system with the required functional parameters and an acceptable level of correction of both chromatic and monochromatic aberrations. The performance of a lens design process greatly depends on a structure of the given merit function. The time interval, required to carry out automated design of an optical system with a number of variables about 20, does not exceed a few hours. The image quality of the obtained lenses enables to use them with existing matrix image sensors.

Keywords: lens, optical system, adaptive Cauchy differential evolution, automated calculation, global optimization.

*Надійшла до редакції
04 лютого 2016 року*

*Рецензовано
18 лютого 2016 року*

© Сокуренько В. М., Буйлов І. С., 2016

УДК 628.9

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРОКОМПАРАТОРА

Михеенко Л. А., Бахаревич А. А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

E-mail: mlaoeop@gmail.com

Проведен метрологический анализ оригинального широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе двух оптически-сопряженных интегрирующих сфер для прецизионной радиометрии, проанализированы его метрологические характеристики которые существенно превосходят известные аналоги. Проанализированы основные погрешности спектрокомпаратора, разработаны рекомендации по их минимализации и выбору элементной базы.

Ключевые слова: *спектрокомпаратор, метрологический анализ, радиометрия, интегрирующая сфера*

Введение

Одним из основных устройств систем передачи единиц радиометрических величин (прежде всего яркости и спектральной плотности яркости), является спектрокомпаратор, метрологические характеристики которого и определяют, в первую очередь, погрешности, диапазон работы и спектральные характеристики конкретного участка поверочной схемы [1]. Однако известные спектрокомпараторы, особенно высших разрядов, по мнению специалистов уже не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, прежде всего по динамическому диапазону сравниваемых радиометрических величин и общей погрешности компарирования, в которой основную долю составляют погрешности позиционирования компаратора относительно излучателей и погрешности установки коэффициента ослабления [2–4].

Целью настоящей работы является метрологический анализ рассмотренного в [5] оригинального широкодиапазонного спектрокомпаратора на базе двух оптически-сопряженных интегрирующих сфер и разработка рекомендаций по его проектированию с заданными точностными параметрами.

Постановка задачи

Метрологический анализ и разработка практических рекомендаций по выбору и элементной базы и проектированию с заданными точностными параметрами.

Основная часть

Схема широкодиапазонного спектрокомпаратора показана на рис. 1.

Она состоит из оптического ослабителя, на входную апертуру которого поступает