

УДК 681.78

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ФОТООБ'ЄКТИВА З ВИПРАВЛЕНОЮ ДИСТОРСІЄЮ

Сокурєнко В. М., Бондарчук Д. П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: bondarchuk_di@ukr.net

В роботі здійснено автоматизований розрахунок оптичних систем об'єктивів зі зменшеною дисторсією за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференціальної еволюції Коші. Завдяки використанню спеціального програмного забезпечення в автоматизованому режимі виконано експериментальну перевірку дієздатності такого підходу на прикладі розрахунку об'єктива-апохромата, аналогічного запатентованому варіанту. Отримані результати свідчать, що розраховані два варіанти за якістю зображення переважають вихідну систему фотооб'єктива з патентного джерела.

Ключові слова: оптична система, аберація, фотооб'єктив, дисторсія, зоряний датчик, автоматизований розрахунок.

Вступ

Контроль та компенсація дисторсії має важливе значення для багатьох оптико-електронних приладів, в яких оптичні системи формують дійсне зображення. Прикладом можуть слугувати зоряні датчики, які містять в своєму складі матричні приймачі випромінювання. Якщо раніше розвиток апаратних засобів астроорієнтації літальних апаратів був традиційно пов'язаний з розробкою та вдосконаленням гірокомпасів [1 – 4], то останнім часом почали все частіше використовуватися зазначені типи зоряних датчиків. Просторова орієнтація визначається по знайденим на зображенні координатам зірок, які потрапили у поле зору приладу. При цьому фотооб'єктив є важливою складовою частиною датчика, адже він відповідає за побудову якісного зображення зоряного неба. Очевидно, що некомпенсована дисторсія, виявлена в цифровому зображенні, може бути скоригована програмним способом. Проте для уникнення необхідності виправлення зображення цифровими методами раціонально використовувати фотооб'єктиви з дисторсією, виправленою апаратно (тобто оптичною системою).

Під час розрахунку аберація дисторсії виправляється оптимізацією конструктивних параметрів оптичної системи (ОС). Складність повної корекції дисторсії полягає в тому, що ця аберація проявляється у викривленні зображення з нелінійною залежністю від поля зору ОС. Традиційним методом виправлення дисторсії є використання багатолінзових систем. В цілому, підходи до виправлення дисторсії ґрунтуються на теорії аберацій 3-го або 5-го порядку, або ж на оптимізації готових оптичних систем [5 – 8]. Недоліком першого підходу є обмеженість розв'язку абераціями низьких порядків, а другого – потреба у вихідній системі з задовільною якістю зображення.

Останніми роками для розв'язання складних задач в різних галузях науки та техніки (в тому числі, під час проектування оптичних систем) все більшої популярності набувають сучасні алгоритми глобальної оптимізації. Їх перевагами є ефективність та можливість отримання розв'язку за помірний час. Однак, треба зазначити, що багато з них можуть вимагати залучення значних обчислювальних ресурсів, особливо під час пошуку розв'язку задач з великою кількістю змінних.

Постановка задачі

Метою роботи є доведення шляхом проведення моделювання можливості здійснення автоматизованого параметричного синтезу оптичної системи фотооб'єктива зі значенням дисторсії, що не перевищує 0,05 %. Для досліджень в даній роботі вибрано світлосильний об'єктив-апохромат, описаний в [9]. Нижче буде показано, що задача розрахунку подібної ортоскопічної оптичної системи може бути вирішена повністю в автоматичному режимі з використанням одного з сучасних методів глобальної оптимізації.

Запропонований підхід

В останні роки все більшого розвитку та розповсюдження набули як детерміновані, так і стохастичні методи глобальної оптимізації [10 - 20]. Серед них виділяються методи оптимізації, що базуються на диференціальній еволюції [21 - 29], призначені для знаходження глобального мінімуму (або максимуму) недиференційованих, нелінійних та мультимодальних (з великою кількістю локальних екстремумів) функцій від багатьох змінних. Ці методи оптимізації є прямими методами (нульового порядку), адже вони потребують лише можливості обчислення значень оціночної функції, без необхідності оцінки похідних.

Класичний варіант методу [21] є простим у програмній реалізації та використанні, адже він містить лише два керуючих параметри-коефіцієнти F та C . Вони відповідають за амплітуду генерування координат мутантного вектору та ймовірність схрещування векторів, відповідно.

В даній роботі використовується один з останніх вдосконалених варіантів методу диференціальної еволюції, а саме – адаптивний метод диференційної еволюції Коші [30, 31]. Його особливістю є те, що для кожної пошукової змінної зберігаються власні контрольні параметри-показники F та C . Перевага цього методу полягає в тому, що на кожній новій ітерації методу його параметри-показники знаходяться на основі середніх значень, успішно знайдених на попередніх ітераціях.

Зазначений алгоритм глобальної оптимізації був інтегрований в програму PODIL для автоматизованого проектування оптичних систем. Нижче буде показано, що реалізований в програмі підхід до розрахунку дозволяє проектувати оптичні системи різноманітного призначення, які не поступаються за якістю зображення запатентованим варіантам.

Результати моделювання

Досліджуваний об'єктив містить два позитивних компонента та одну негативну лінзу (рис. 1, а). Перший компонент містить чотири лінзи: першу – негативний меніск, повернений опуклістю до предмету, другу – двояковипуклу, третю – негативну з першою увігнутою поверхнею та четверту – позитивну з першою випуклою поверхнею.

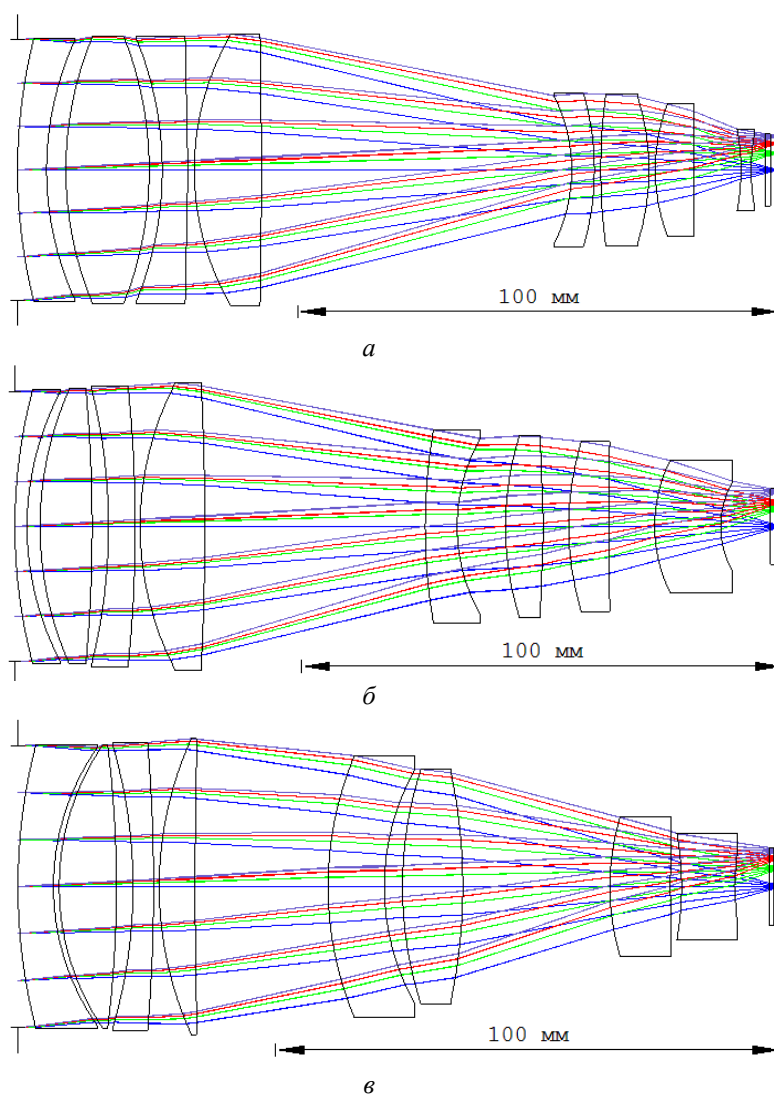


Рис. 1. Оптичні схеми об'єктива з ходом променів: *a* – оригінальний варіант з [9]; *б* – фотооб'єктив, розрахований як двохкомпонентна система; *в* – фотооб'єктив, розрахований без обмежень на допустимі осьові відстані

Другий компонент містить три лінзи, перша з яких – негативна з першою увігнутою поверхнею, друга – позитивна з другою опуклою поверхнею, а третя – позитивна з першою опуклою поверхнею. Одиночна негативна лінза має першу увігнуту поверхню. Відстань між другим компонентом та одиночною негативною лінзою менша за 0,2 фокусної відстані об'єктива. Зазначений об'єктив має фокусну відстань 100 мм, кутове поле зору $8,4^\circ$, відносний отвір 1:1,8, робочий спектральний діапазон 0,404...0,706 мкм з основною довжиною хвилі 0,546 мкм. Перевірка дієздатності зазначеного алгоритму була здійснена для двох можливих варіантів побудови об'єктива (рис. 1, б, в). В першому варіанті проведено розрахунок фотооб'єктива як двохкомпонентної системи зі значною осьовою відстанню між компонентами (її значення перевищує 35 мм). Другий варіант знайдено без обмежень на осьові повітряні проміжки.

Параметрами оптимізації обрані радіуси кривизни всіх поверхонь (окрім останньої) та всі

осьові відстані. Значення кута апертурного променя було встановлене фіксованим, що гарантувало незмінне значення задньої фокусної відстані оптичної системи.

У якості критерію оптимізації прийнято умову мінімізації СКВ похибки хвильового фронту для чотирьох точок поля зору одночасно з мінімізацією СКВ радіусу світлових плям для осьового та периферійного пучків.

Під час розрахунку двох варіантів систем були задані такі додаткові обмеження: максимальне значення відстані від першої поверхні до площини зображень по осі – 170 мм, а допустиме значення відносної дисторсії не повинно перевищувати 0,001 % (по модулю). При цьому значення дисторсії контролювалося з невеликим ваговим коефіцієнтом в оціночній функції для двох кутів поля зору (на рівні 0,7 від максимального та на периферії).

В табл. 1 і 2 наведено конструктивні параметри розроблених об'єктивів.

Таблиця 1. Конструктивні параметри фотооб'єктива, розрахованого як двохкомпонентна система

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Середовище (скло)	Світловий діаметр, мм
1 (апертурна діафрагма)	∞	–	–	55,560
2	109,497	2,52	К8	56,1
3	59	2,7	повітря	55,6
4	68,619	10,83	CAF2	56,4
5	-309,127	3,4	повітря	56,5
6	-115,851	5,56	ОФ6	56,5
7	-274,71	0,99	повітря	57,7
8	63,287	13,45	CAF2	59
9	-564,038	45,76	повітря	57,8
10	114,98	6,63	ОФ4	39,9
11	36,669	10,06	повітря	36,3
12	62,295	7,88	CAF2	37,3
13	-246,804	5,23	повітря	36,9
14	60,513	8,37	CAF2	35
15	953,091	9,59	повітря	33
16	30,453	13,68	ОФ6	27,1
17	18,599	10,35	повітря	18,6
18	∞	1	К8	15,6
19	∞	1,7	повітря	15,3

Слід зазначити, що як й очікувалося, в цілому, аберації фотооб'єктива, розрахованого без обмежень на допустимі осьові відстані, виправлені краще, чим в інших варіантах (табл. 3). Проте значення максимальної відносної дисторсії по полю у всьому спектральному діапазоні та для основної довжини хвилі ($\lambda = 0,546$) мкм виявилися меншими у фотооб'єктива, розрахованого як двохкомпонентна система.

Графіки модуляційної передаточної функції (МПФ) та залежностей аберацій від кута поля зору

представлені на рис. 2 – 5, де *a* – для фотооб'єктива з [9]; *b* – для фотооб'єктива, розрахованого як двохкомпонентна система; *в* – для фотооб'єктива, розрахованого без обмежень на допустимі осьові відстані.

Отримані результати свідчать про високу якість зображення синтезованих оптичних систем фотооб'єктивів та збалансованість їх аберацій по полю зору.

Таблиця 2. Конструктивні параметри об'єктива, розрахованого без обмежень на допустимі осьові відстані

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Середовище (скло)	Світловий діаметр, мм
1 (апертурна діафрагма)	∞	–	–	55,6
2	112,484	7	К8	56,1
3	47,777	1,14	повітря	55,1
4	49,610	11,35	CAF2	55,9
5	-225,175	3,28	повітря	55,9
6	-98,916	4,06	ОФ6	55,8
7	-347,383	1,105	повітря	56,9
8	70,324	7,04	CAF2	58,4
9	1007,066	26,38	повітря	58,2
10	66,594	11,14	ОФ4	51,8
11	47,381	3,58	повітря	46,3
12	75,374	11,98	CAF2	46,2
13	-108,699	29,07	повітря	44,9
14	48,102	11,95	CAF2	27,4
15	241,837	2,25	повітря	21,8
16	-59,731	10,46	ОФ6	21
17	57,504	6,82	повітря	17,3
18	∞	1	К8	15,4
19	∞	1,7	повітря	15,2

Таблиця 3. Порівняння абераций оптичних систем

Аберация	Значення абераций для ОС фотооб'єктивів		
	Варіант з [9]	Варіант розрахований як двохкомпонентна система	Варіант розрахований без обмежень на допустимі осьові відстані
Максимальна поперечна аберация по полю зору у всьому спектральному діапазоні, мкм	14,6	12,7	12
Максимальна хвильова аберация по полю зору у всьому спектральному діапазоні, λ	2,28	3,28	1,45
Максимальна відносна дисторсія по полю зору для основної довжини хвилі $\lambda = 0,546$ мкм (та у всьому спектральному діапазоні), %	0,016 (0,019)	0,004 (0,014)	0,022 (0,028)

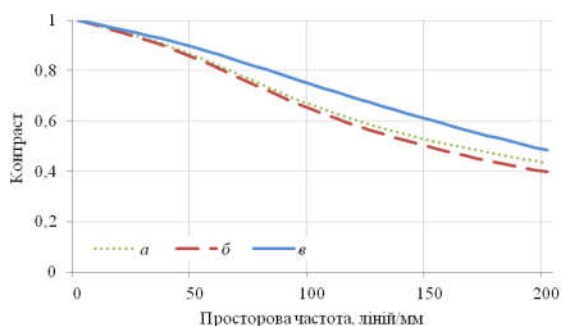


Рис. 2. Поліхроматичні МПФ для осьового пучка

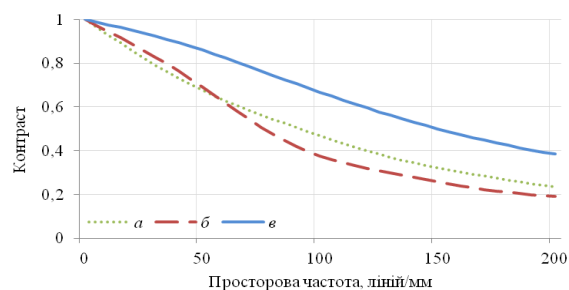


Рис. 3. Поліхроматичні МПФ на краю поля зору

Висновки

У даній роботі здійснено експериментальну перевірку можливості повної автоматизації процедури параметричного синтезу класичного фото-

об'єктива з виправленою дисторсією. Отримані результати свідчать, що розраховані варіанти за якістю зображення переважають вихідну систему фотооб'єктива з патентного джерела.

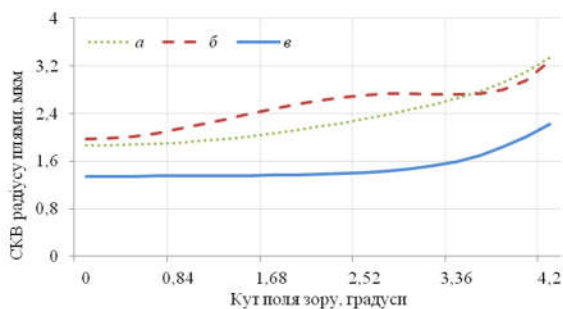


Рис. 4. Залежності СКВ радіусу поліхроматичної світлової плями від кута поля зору

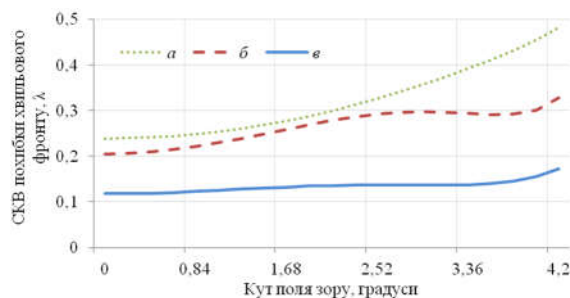


Рис. 5. Залежності СКВ похибки хвильового фронту від кута поля зору (для поліхроматичного світла)

Проведене моделювання підтверджує, що адаптивний метод диференціальної еволюції Коші є потужним засобом, за допомогою якого можна здійснювати параметричний синтез практично довільних оптичних систем з параметрами, що задовольнятимуть встановленим конструктором вимогам. Перспективним напрямком вдосконалення автоматизованих засобів проектування оптичних систем є використання нових або модифікованих методів глобальної оптимізації, які виявилися ефективними для інших областей науки та техніки.

Література

- [1] В. Ю. Ревенко, Электронавигационные приборы, Учебное пособие, Раздел Гироскопсы, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://deckofficer.ru/titul/study/item/komp-astronav>
- [2] В. Брюховець, Компьютерная астронавигация, Библиотека судоводителя, 2009. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://deckofficer.ru/titul/study/item/komp-astronav>
- [3] Chris A. Mack, "Field guide to optical lithography", *SPIE field guides*. FG 06 [Series Editor John E. Gleivenkamp]. Bellingham, WA 98227-0010, 1978.
- [4] М. Е. Прохоров, А. И. Захаров, А. В. Миронов, Ф. Н. Николаев, М. С. Тучин, "Современные датчики звездной ориентации" на 38 междунар. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2009, с. 170-186.
- [5] H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger, *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.
- [6] Н. П. Заказнов, С. И. Кирышин, В. И. Кузичев *Теория оптических систем*: учеб. для студ. приборостроит. спец. вузов. Москва, Россия: Машиностроение, 1992.
- [7] Д. Е. Пискунов, А. М. Хорохоров, "Аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем", *Наука и образование*, № 7, с. 153-162, 2012.
- DOI: 10.7463/0712.0442505.
- [8] E. Fischer, B. Tadic-Galeb, P. R. Yoder, *Optical system design*. SPIE Press. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [9] А. Г. Максимов, "Светосильный объектив апохромат", Пат. РФ 2338225, G02B4 9/64, 10.11.2008.
- [10] M. Ali, A. Törn, S. Viitanen, "Stochastic Global Optimization: Problem, Classes and Solution Techniques", *J. of Global Optimization*, no. 14, pp. 437-447, 1999.
- [11] K. Rinnoy, G. Timmer, "Stochastic Global Optimization Methods", *Mathematical programming*, no. 39, pp. 27-78, 1987.
- [12] Törn, S. Viitanen, "Topographical Global Optimization Using Pre-Sampled Points", *Journal of Global Optimization*, Vol 5, no 3, pp. 267-276, 1994.
- [13] Yu. Evtushenko, M. Potapov, V. Korotkich, *Recent Advances in Global Optimization*. Princeton, Princeton University Press, 1992.
- [14] E. Hansen, *Global Optimization Using Interval Analysis*. New York: Marcel Dekker, 1992.
- [15] S. Gomez, A. Levy, *The Tunneling Method Applied to Global Optimization*, SIAM, Numerical Optimization (Boggs, P.T., ed.), 213-244, 1985.
- [16] M. Ali, C. Storey, "Aspiration Based Simulated Annealing Algorithm", *J. of Global Optimization*, no. 11, pp. 181-191, 1996.
- [17] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [18] W. L. Price "A Controlled Random Search Procedure for Global Optimization", *The Computer Journal*, no. 20, pp. 367-370, 1977.
- [19] Diener, "Trajectory Methods in Global Optimization", in *Handbook of Global Optimization*, Horst R., Pardalos P.M., Eds. Dordrecht: Kluwer, 1995, pp. 649-668.
- [20] С. К. Завриев, И. В. Орлянская, Ю. Н. Перунова, "Об одном подходе к конструированию алгоритмов продолжения в глобальной оптимизации", *Вестн. МГУ, Вычисл. математика и кибернетика*, № 2, 2000.
- [21] R. Storn, K. Price, Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global

- optimization over continuous spaces, TR-95-012, March 1995.
- [22] L. Bezerra, M. Lopez-Ibanez, T. Stutzle, "To DE or not to DE? Multi-Objective Differential Evolution Revisited from a Component-Wise Perspective", *IRIDIA – Technical Report Series*, February 2015.
- [23] R. Thangaraj, M. Pant, P. Bouvry, A. Abraham, "Solving stochastic programming problems using modified differential evolution algorithms", *Logic Journal of IGPL Advance Access published*, February 8, 2011.
- [24] M. Ali, M. Pant, A. Abraham, "Simplex Differential Evolution", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 6, no. 5, 2009.
- [25] Brezt, A. Zamuda, B. Boskovic, S. Greiner, M. Maucec, V. Zumer, "Self-Adaptive Differentiation Evolution with SQP Local Search", Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor Maribor, Slovenia, 2008.
- [26] Qin, V. Huang and P. Suganthan, "Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 13, no. 2, April 2009, pp. 398-416.
- [27] LaTorre, S. Muelas, J. Pena, "Large Scale Global Optimization: Experimental Results with MOS-based Hybrid Algorithms", Facultad de Informatica, Universidad Politecnica de Madrid Instituto Cajal, Centro Superior de Investigaciones Cientificas, 2013.
- [28] S. Das, S. Mullick, P. Suganthan, "Recent Advances in Differential Evolution – An Updated Survey", Electronics and Communication Sciences Unit, Indian Statistical Institute, Kolkata-700 108, India, School of Electrical and Electronics Engineering, Nanyang technological University, Singapore, 2011.
- [29] В. М. Сокурєнко, В. С. Неділюк, "Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації", *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, № 1, с. 81-88, 2012.
- [30] T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An, "An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization", *The Scientific World Journal*. July 2, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/969734>
- [31] T. J. Choi, C. W. Ahn, "An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization", *Journal of Computers*, Vol. 9, no 9. pp. 2139-2145, 2014. DOI: 10.4304/jcp.9.9.2139-2145.

УДК 681.78

В. М. Сокурєнко, Д. П. Бондарчук*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», Київ, Україна***АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФОТООБЪЕКТИВА С УМЕНЬШЕННОЙ ДИСТОРСИЕЙ**

В работе осуществлен автоматизированный расчет оптических систем объективов с уменьшенной дисторсией с помощью одного из современных алгоритмов глобальной оптимизации, а именно адаптивного метода дифференциальной эволюции Коши. Благодаря использованию специального программного обеспечения выполнена экспериментальная проверка дееспособности такого подхода на примере расчета объектива-апохромата, аналогичного запатентованному варианту. Объектив, выбранный для исследования, имеет фокусное расстояние 100 мм, угловое поле зрения 8,4°, относительное отверстие 1:1,8 и рабочий спектральный диапазон 0,404...0,706 мкм. Уровень его остаточной относительной дисторсии по всему полю не превышает 0,02 %. Результаты, полученные в автоматизированном режиме, подтверждают, что качество изображения рассчитанных двух вариантов превышает качество изображения исходной системы фотообъектива, представленной в патентном источнике.

Ключевые слова: оптическая система, абберация, фотообъектив, дисторсия, звездный датчик, автоматизированный расчет.

V. M. Sokurenko, D. P. Bondarchuk*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***AUTOMATED PARAMETRIC SYNTHESIS OF A PHOTOGRAPHIC LENS WITH REDUCED DISTORTION**

Almost complete correction of distortion is required in a variety of optoelectronic devices in which optical systems create real images. The star trackers containing matrix image sensors are an example of such devices. Since the star trackers are installed on satellites or spacecrafts, it is desirable to avoid extra energy assumption due to necessity of applying digital processing techniques for correction of the image distortion. For such devices, it is reasonable to use the lenses which have distortion reduced to a practically zero level by optical means.

Since the aberration of distortion has a nonlinear dependence on field, it can be corrected mostly in multi-lens systems. Unfortunately, the approach to optical design based on the 3rd order aberration theory does not take into account high-order aberrations. Another widely-used method based on local optimization requires to apply initial optical systems with already satisfactory image quality.

This paper describes the implementation of automated optical design of lenses with reduced distortion by using of one of modern global optimization algorithms, namely, the adaptive Cauchy differential evolution algorithm.

By using specialized optical design software, an experimental verification of the feasibility of the proposed approach has been fulfilled in a completely automated mode. The computer simulation of a parametric synthesis process has been done on an example of the orthoscopic lens, similar to one already patented. The lens, which was selected for a comparison study, has the focal length of 100 mm, the angular field of view of 8.4°, the relative aperture of 1:1.8 and the working spectral range of 0.404 to 0.706 μm. The level of its residual relative distortion over the entire field does not exceed 0.02%. The obtained results indicate that the image quality of two found solutions exceeds the image quality of the prototype lens indicated in the patent.

Keywords: optical system, aberration, camera lens, distortion, star tracker, automated design.

Надійшла до редакції
09 листопада 2018 року

Рецензовано
20 листопада 2018 року

УДК 535.4, 535.8

КОРЕЛЯЦІЙНО-ОПТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОБЛЕМИ ГОЛОГРАФІЧНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

¹⁾Богатирьова Г. В., ²⁾Полянський П. В., ²⁾Фельде Х. В., ³⁾Зелінський Є. В.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, Чернівці, Україна

³⁾Люблянський університет, Любляна, Словенія

E-mail: halyna.bohatyrova@lil.kpi.ua, christinafelde@gmail.com,
yevhen.zelinskyi@fe.uni-lj.si

Проблема голографічної асоціативної пам'яті обговорюється в рамках кореляційно-оптичного підходу. Аналіз моделей безопорної голограми та нелінійно зареєстрованих позаосевих голограм, зчитуваних в асоціативному режимі, показує широкий спектр корисних властивостей таких голограм не лише для відновлення відсутньої частини збереженого масиву даних, а й для детектування малих змін ("помилки") у записаній картині, для відновлення повного масиву даних з корекцією помилок за неповною версією масиву, а також для здійснення високоефективного гетероасоціативного відновлення на базі неінтерференційного механізму зв'язку парціальних сигналів. Показано, що візуально оцінювана якість відновленого асоціативного відгуку може наближатись до якості зображення, що досягається у звичайній позаосевій голографії.

Ключові слова: голографія, асоціативна пам'ять, фантомне зображення, фазове спряження, голографія другого порядку.

1. ВСТУП

Розвиток голографічної асоціативної пам'яті (ГАП) протягом понад 50 років, починаючи з піонерських робіт Ван Хірдена [1, 2], можна умовно розділити на два періоди, а саме ГАП на основі безопорних голограм (або «голограм фантомних зображень») – до середини вісімдесятих років двадцятого століття та нелінійних ГАП – по теперішній час. Метою даної статті є оцінка прогресу, досягнутого у цій області досліджень, та підсумовування можливостей, що забезпечуються у сучас-

них архітектурах ГАП для повністю оптичного збереження та відновлення інформації, а також визначення факторів, які усе ще перешкоджають широкому практичному застосуванню даного підходу в оптичній обробці інформації. ГАП розглядається нами як важливий напрямок й втілення концепції *кореляційної оптики* [3]. Однією з підстав для написання цього огляду є 50-та річниця отримання першої голограми й започаткування досліджень з ГАП в Україні, чим зумовлена увага авторів до історичних аспектів проблеми.