

УДК 681.7.067.2

*М.М. Вакуленко, студент гр. ПО-62м, к.т.н., доц. Сокуренько В.М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

СИНТЕЗ ДИФРАКЦІЙНО-РЕФРАКЦІЙНОГО ОБ'ЄКТИВА

Анотація. Метою статті є доведення можливості здійснення автоматизованого параметричного синтезу дифракційно-рефракційного об'єктива. У статті запропоновано методику синтезу нових оптичних систем, зокрема об'єктивів з дифракційними оптичними поверхнями, на основі сучасного методу глобальної оптимізації – адаптивного методу диференційної еволюції Коші. В роботі синтезовано оптичну систему об'єктива, яка містить дифракційну оптичну поверхню. Проведене порівняння з вихідною системою доводить ефективність та результативність запропонованого підходу.

Ключові слова: дифракція, об'єктив, оптична система, глобальна оптимізація, дифракційний елемент

ВСТУП

Сьогодні дифракційна оптика – це галузь досліджень, що швидко розвивається. Продовжують з'являтися доповіді конференцій та спеціальні випуски оптичних журналів, в яких публікуються авторитетні оцінки сучасного стану та ствердження щодо майбутніх перспектив дифракційної оптики. Цьому сприяють декілька факторів. Зокрема, дифракційні оптичні елементи (ДОО) дозволяють маніпулювати світловими полями таким чином, як раніше було неможливим з традиційною заломлюючою та відбиваючою оптикою. Крім того, ДОО можуть бути дешевими та легкими у виробництві [1].

ДОО переважно використовують для зменшення габаритів й маси об'єктивів. За рахунок дифракції світлового потоку на неперервному мікро-рельєфі поверхні лінзи може досягатися ефект біфокальності у дифракційно-рефракційних лінзах. При використанні ДОО стає можливим проектування гібридних елементів для отримання ахроматичних скоригованих елементів за рахунок того, що дифракційні поверхні мають від'ємний коефіцієнт дисперсії [2].

Існуючі підходи до проектування подібних систем ґрунтуються на теорії аберацій 3-го або 5-го порядку [3] або ж на оптимізації готових рішень. Подібні класичні методики мають ряд недоліків, тому й виникла необхідність в універсальному підході, який не потребував би якісної вихідної системи та досвіду висококваліфікованого розробника.

ЗАПРОПОНОВАНИЙ ПІДХІД ТА ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Для опису дифракційного елемента в даній роботі використовуються дифракційні поверхні, фаза яких описується таким степеневим виразом:

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i} \quad (1)$$

де N – кількість поліноміальних коефіцієнтів; A_i – коефіцієнт при ρ^{2i} ; ρ – нормована радіальна координата апертури; M – порядок дифракції.

Для синтезу оптичної системи (ОС) об'єктива пропонується використовувати один із сучасних методів глобальної оптимізації – адаптивний метод диференційної еволюції Коші [4, 5]. Особливістю цього методу є те, що кожен змінний пошуковий параметр має свої значення параметрів диференційної еволюції. Сутність такого підходу зводиться до того, що на кожний новий

ітерації алгоритму його параметри визначаються на основі середніх значень показників, отриманих під час попередніх ітерацій (тобто, фактично ці параметри адаптуються до реальної оціночної функції). 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.

Як приклад для розрахунку було обрано об'єктив Tessar [6]. Його оптична система має фокусну відстань 100 мм, кутове поле зору 30° , апертуру $F/3,5$ (рис. 1). Об'єктив призначений для роботи у спектральному діапазоні $0,48 \dots 0,644$ мкм з основною довжиною хвилі 0,546 мкм (рисунок 1). Під час його параметричного синтезу було встановлено додаткові обмеження на мінімальну та максимальну осеві товщини 2 мм і 8 мм, відповідно, мінімальну товщину на краю – 0,2 мм та максимальне допустиме значення дисторсії – 0,15%.

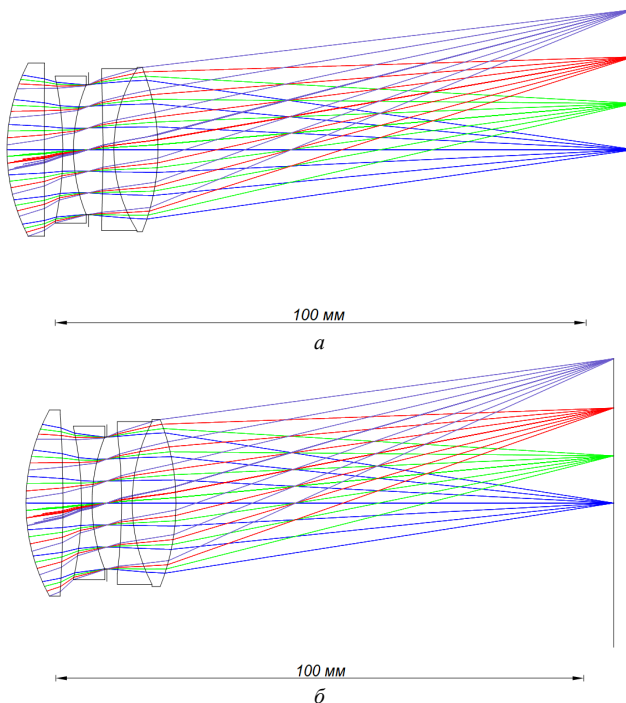


Рисунок 1. Оптичні схеми об'єктивів з ходом променів:
a – оптимізований варіант з виключно сферичними поверхнями; *б* – розрахований варіант з дифракційною поверхнею

На (рис. 1,*б*) показана оптична схема розробленого окуляра, а в (табл.1) – його конструктивні параметри.

Таблиця 1. Конструктивні параметри розрахованого об'єктива

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщи- на, мм	Середовище	Світловий діаметр, мм	
Предмет	∞	∞	—	0	
1	33,303	7,04	N-BAF10	33,288	
2	-238,886	3,5	—	31,702	
3	-61,018	2	N-F2	27,442	
4 (дифракційна поверхня)	30,264	2,8	—	23,798	
5 (апертурна діафрагма)	∞	2,8	—	23,628	
6	-98,199	2	LF5	25,218	
7	30,052	8,3	N-BAF10	29,106	
8	-38,72	82,9	—	29,848	
Зображення	∞	0	—	51,604	
Додаткові параметри дифракційної поверхні 4					
Дифракційний порядок	Нормувальний радіус, мм	Кількість фазових коефіцієнтів	Коефіцієнт при ρ^2	Коефіцієнт при ρ^4	Коефіцієнт при ρ^6
1	13	3	-5,557E+02	5,241E+02	-1,886E+02

Оскільки ОС з виключно сферичними поверхнями візуально подібна до розрахованого варіанту з дифракційною поверхнею, то доречним буде порівняти числові значення основних абераций цих систем (табл.2).

Таблиця 2. Порівняльна таблиця числових значень основних абераций

<i>Аберация</i>	<i>ОС з виключно сферичними поверхнями</i>	<i>ОС з дифракційною поверхнею</i>
Поперечна сферична аберация (для осн. довжини хвилі), мм	0,041	0,013
Поперечна сферична аберация (у всьому спектр. діапазоні), мм	0,053	0,018
Повздовжня сферична аберация (для осн. довжини хвилі), мм	0,738	0,158
Повздовжня сферична аберация (у всьому спектр. діапазоні), мм	1,081	0,305
Поперечна аберация на краю поля зору для меридіонального та сагітального пучків (для осн. довжини хвилі), мкм	84,828	75,134
Поперечна аберация на краю поля зору для меридіонального та сагітального	89,018	96,227

пучків (у всьому спектр. діапазоні), мкм		
Відносна дисторсія (для осн. довжини хвилі), %	0,445	0,15
Астигматична різниця	0,614	0,279
Макс. перепад хвильової аберації в центрі поля зору (для осн. довжини хвилі)	2,682λ	1,716λ
Макс. перепад хвильової аберації на краю поля зору (для осн. довжини хвилі)	9,379λ	4,844λ
СКВ хвильової аберації в центрі поля зору (для осн. довжини хвилі)	0,607λ	0,556λ
СКВ хвильової аберації на краю поля зору (для осн. довжини хвилі)	2,169λ	1,051λ

У порівнянні з об'єктивом, який містить виключно сферичні заломлюючі поверхні, в ОС, що містить дифракційну поверхню, аберації виправлено краще. Так, середньоквадратичний радіус світлової поліхроматичної плями на осі дорівнює 8,52 мкм і на краю поля зору – 26,22 мкм (в оптимізованому варіанті з виключно сферичними заломлюючими поверхнями – 29,99 мкм і 39,88 мкм, відповідно). Дисторсія розрахованого об'єктива по всьому полю зору є меншою за 0,15%. Для осевого пучка та основної довжини хвилі перепад хвильового фронту не перевищує 1,716λ. Відповідні графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій (МПФ) наведено на (рис. 2).

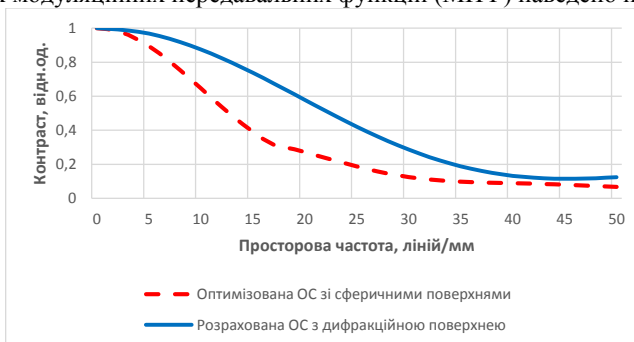


Рисунок 2. Графіки розрахованих поліхроматичних МПФ об'єктива для осевого пучка в дифракційному наближенні

ВИСНОВКИ

У даній роботі здійснено перевірку можливості синтезу об'єктива з диф-

ракційною оптичною поверхнею. Проведеним чисельним моделюванням доведено, що використання дифракційних поверхонь дозволяє покращити якість зображення ОС.

Отримані результати свідчать, що розрахована система дифракційно-рефракційного об'єктива за якістю зображення переважає вихідну систему з виключно сферичними заломлюючими поверхнями. Зокрема, середньоквадратичний радіус поліхроматичної плями в середньому по всьому полю зору є майже втричі меншим, а значення МПФ суттєво поліпшені (особливо на середніх просторових частотах).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. Martellucci, A. N. Chester Diffractive Optics and Optical Microsystems. Springer Science & Business Media, 2013 – ISBN 978-0306457708
2. Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Соколова Е.А. Приемушества использования дифракционных оптических элементов в простых оптических изображающих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. №1. С. 6-13
3. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. / H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger ; Edited by Herbert Gross. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. – ISBN 978-3527403790
4. Choi Tae Jong. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization / T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 969734, 12 pages. – DOI 10.1155/2013/969734
5. Choi Tae Jong. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization / T. J. Choi, C. W. Ahn // Journal of Computers. – 2014. – Vol. 9, No 9. – Pp. 2139-2145. – DOI 10.4304/cp.9.9.2139-2145
6. Handbook of Optical Design, Third Edition / D. Malacara-Hernandez, Z. Malacara-Hernandez – CRC Press, Boca Raton, 2013. – ISBN 978-1439868010