

В.М. СОКУРЕНКО, О.В. ТРОСТЯНСЬКА

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

СИНТЕЗ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКУЛЯРА ДЛЯ МІКРОДИСПЛЕЯ З ВИСОКОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ

В роботі здійснено автоматизований параметричний синтез оптичної системи шестилінзового окуляра за допомогою одного з алгоритмів глобальної оптимізації. Окуляр призначений для спостереження зображення з OLED мікродисплея, що функціонує у видимому спектральному діапазоні, має кількість пікселів 2048×2048 і розмір діагоналі випромінювальної площадки 1 дюйм. Безпосередній процес розрахунку оптичної системи здійснювався без активної участі конструктора. Представлені точкові діаграми та графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій свідчать про високу якість зображення оптичної системи синтезованого окуляра.

Ключові слова: окуляр, мікродисплей, OLED, оптична система, оптимізація, параметричний синтез.

V.M. SOKURENKO, O.V. TROSTIANSKA

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

SYNTHESIS OF EYEPIECE OPTICAL SYSTEM FOR HIGH-RESOLUTION MICRODISPLAY

In previous years, microdisplays were mostly used as image sources for television systems, projectors, digital camera viewfinders, and helmet display systems. Today, different microdisplays have become widely applied in smart glasses, augmented and virtual reality systems, windshield imaging systems, medicine, military equipment, etc. Regardless of the technology involved, modern microdisplays require to use specialized optical components (like mirrors, prisms, or eyepieces) to provide the required magnification and comfortable viewing conditions. To perform optical design of the eyepiece system, the numerical technique based on one of novel differential evolution algorithms is proposed. Specifically, in this article, an automated parametric synthesis was fulfilled for a six-lens high-resolution optical system of an eyepiece with the long eye relief. The eyepiece is intended for viewing an image obtained from the OLED microdisplay which operates in the visible spectral range and has the pixel resolution of 2048×2048 and a 1-inch size of its diagonal. The process of computing the optical system was carried out automatically, i.e. without active involvement of the designer. The developed optical system of the eyepiece has the effective focal length 40,7 mm and the angular field of view 35° . It provides the long eye relief (equal to 50 mm) and low relative distortion (less than 2%). It can be used for the human eye pupil with diameter up to 7 mm. The presented image spot diagrams and modulation transfer function charts prove the high image quality of the designed optical system of the eyepiece. In particular, the polychromatic RMS spot radii do not exceed $11 \mu\text{m}$ over the full field, while the polychromatic modulation transfer function value for the axial beam at the spatial frequency 50 lines/mm is higher than 0.45.

Keywords: eyepiece, microdisplay, OLED, optical system, optimization, parametric synthesis.

Вступ

Мікродисплеї почали активно застосовуватись в промисловості в 90-х роках 20-го століття. Переважно вони використовувались як джерело зображення для телевізійних систем, проекторів, видошукачів для цифрових фотоапаратів та нашоломних систем відображення. В сучасних умовах мікродисплеї набули широкого вжитку в «розумних» окулярах, системах доповненої та віртуальної реальності, системах проектування зображення на лобове скло, медицині, військовій техніці тощо. Якісні зразки розглянутих приладів та систем потребують застосування мікродисплеїв з великою роздільною здатністю та високою якістю зображення, тому з кожним роком технологія їх виробництва постійно вдосконалюється [1, 4].

Сучасні мікродисплеї мають такі особливості [2–4]: забезпечують високу роздільну здатність; мають малий фізичний розмір (діагональ не більше 25 мм) та вагу; потребують малого енергоспоживання.

Незалежно від закладеної технології функціонування, сучасні мікродисплеї вимагають обов'язкового застосування додаткових оптичних систем (ОС) типу окулярів для забезпечення потрібного збільшення та комфортних умов спостереження зображення. Параметричному синтезу подібної ОС – лінзового окуляра – й присвячена дана робота.

Відомі методи розрахунку лінзових окулярів

Існують різні методи розрахунку ОС. Так, один з поширених «класичних» підходів зводиться до синтезу системи на базі теорії аберацій ОС 3-го та рідше 5-го порядків. Для багатокомпонентних систем визначаються основні монохроматичні та хроматичні абераційні параметри тонких компонентів або компонентів зі значною товщиною [5]. Однак, розглянутий підхід дає якісні результати лише для ОС з помірними значеннями поля зору та відносного отвору.

Другий спосіб полягає у використанні компонентів (лінз) з відомими абераційними властивостями відповідно до методики Русінова М. М. [6]. Проте такий метод потребує від розробника ОС значного досвіду та навіть інтуїції та абсолютно не гарантує отримання прийнятного результату.

Третій підхід ґрунтується на використанні локальної оптимізації до вже розроблених ОС, інформація про конструктивні параметри яких є доступною з різних каталогів ОС, опублікованих монографій, довідників, наукових статей або патентних джерел. Зрозуміло, що через особливості локальної оптимізації стартова ОС має бути наближеною до кінцевого розв'язку. Насамперед, це стосується багатоелементних ОС. Таким чином, на сьогодні відсутні аналітичні методи розрахунку окулярів. Незважаючи на те, що сьогодні багато відомих компаній займаються науково-технічною роботою щодо

розробки вдосконалених ОС для спостереження зображення з мікродисплеїв, стверджувати, що ця проблема повністю вирішена, не можливо.

Постановка задачі досліджень

Для розв'язання задачі параметричного синтезу ОС окуляра в даній статті пропонується чисельний метод розрахунку. Зокрема, в роботі здійснено перевірку дієздатності програмного засобу автоматизованого розрахунку, в основу якого покладено один з сучасних алгоритмів глобальної оптимізації. Мета такого підходу – повністю уникнути потреби в якісній стартовій ОС та виключити активну участь конструктора з процесу безпосереднього розрахунку.

Нижче буде показано, що використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення з проектування ОС, можна здійснювати автоматизований пошук конструктивних параметрів ОС окулярів з високою роздільною здатністю, з урахуванням заданих конструктором функціональних параметрів та конструктивних обмежень. Зокрема, в даній статті буде представлено методику та результати автоматизованого синтезу ОС багатолінзового окуляра для сучасного мікродисплея з великою роздільною здатністю.

Сучасні моделі мікродисплеїв з високою роздільною здатністю

З кожним днем галузь виробництва мікродисплеїв розвивається та набуває нових технологій. На сьогоднішній день розробкою мікродисплеїв займається значна кількість компаній, адже такі пристрої все частіше з'являються в нашому повсякденному житті. Тому область досліджень, присвячених розробці різних технологій для мікродисплеїв, є наразі на затребуваному та такою, що швидко розвивається.

На рис. 1 представлені сучасні комерційні зразки мікродисплеїв з високою роздільною здатністю, розроблені провідними світовими компаніями. Табл. 1 містить основні функціональні параметри розглянутих мікродисплеїв, які потрібно враховувати під час розрахунку ОС окулярів.



Рис. 1. Мікродисплеї різних виробників [7–9]: а) Kopin, б) Olightech, в) Zacuto

Таблиця 1

Основні функціональні параметри мікродисплеїв різних виробників

Параметр	KOPIN The lightning 2K OLED	HOLOEYE 4K Resolution-Monochrome	Olightech SXGA 060	Zacuto Gratical HD EVF
Розмір діагоналі	0,99"	0,7"	0,6"	0,61"
Роздільна здатність	2048×2048	4094×2464	1280×1024	1280×1024
Кількість пікселів	4,1 МП	10 МП	1,3 МП	1,3 МП
Розмір пікселя	0,008 мм	0,003 мм	0,009 мм	0,009 мм
Формат кадру	1:1	1,66:1	5:4	16:9

Чисельний розрахунок окуляра

В даній роботі було здійснено розрахунок ОС шестилінзового окуляра для мікродисплея з розміром діагоналі 1", який призначений для роботи в видимому спектральному діапазоні 0,47...0,65 мкм. Параметри подібного мікродисплея представлені в другому стовпці табл. 1.

Розрахунок ОС проводився за допомогою розробленого програмного забезпечення «PODIL» з використанням вбудованих в нього алгоритмів глобальної оптимізації.

Оскільки ОС окуляра належить до систем типу «1-0», що мають площину предметів на кінцевій відстані, а площину зображень – в нескінченності, її традиційно розраховують в зворотному ході променів.

При чисельному моделюванні вихідними даними до розрахунку були встановлені такі параметри:

- спектральний діапазон – видимий (0,47...0,65 мкм);
- кутове поле зору в просторі предметів – 35 градусів;
- задня фокусна відстань – 40,7 мм (разом з заданим кутом поля зору вона визначає розмір діагоналі лінійного зображення $2y' = 25,6$ мм);
- діаметр вхідної зіниці – 7 мм (в даній ОС вхідна зіниця є одночасно й апертурною діафрагмою);
- віддалення зіниці від зовнішньої поверхні окуляра – 50 мм;
- кількість лінз – 6.

Перед запуском процедури параметричного абераційного синтезу було введено такі обмеження:

- діапазон допустимих осьових товщин лінз – 3...7 мм;
- діапазон допустимих осьових повітряних проміжків – 0,1...3 мм;
- діапазон кривизни оптичних поверхонь – (-0,05...0,05) мм;
- мінімальна товщина лінз по краю – 1,5 мм;

- мінімальна товщина повітряних проміжків краю – 1 мм;
- максимальне значення відносної дисторсії по полю для основної довжини хвилі – 2%.

Контроль фокусної відстані здійснювався заданим регулятором – кутом апертурного променя на виході системи. Зокрема, при заданому діаметрі вхідної зіниці (7 мм) тангенс кута дорівнював -0,086.

Стартова ОС була задана практично у формі плоско-паралельних пластинок (рис. 2).

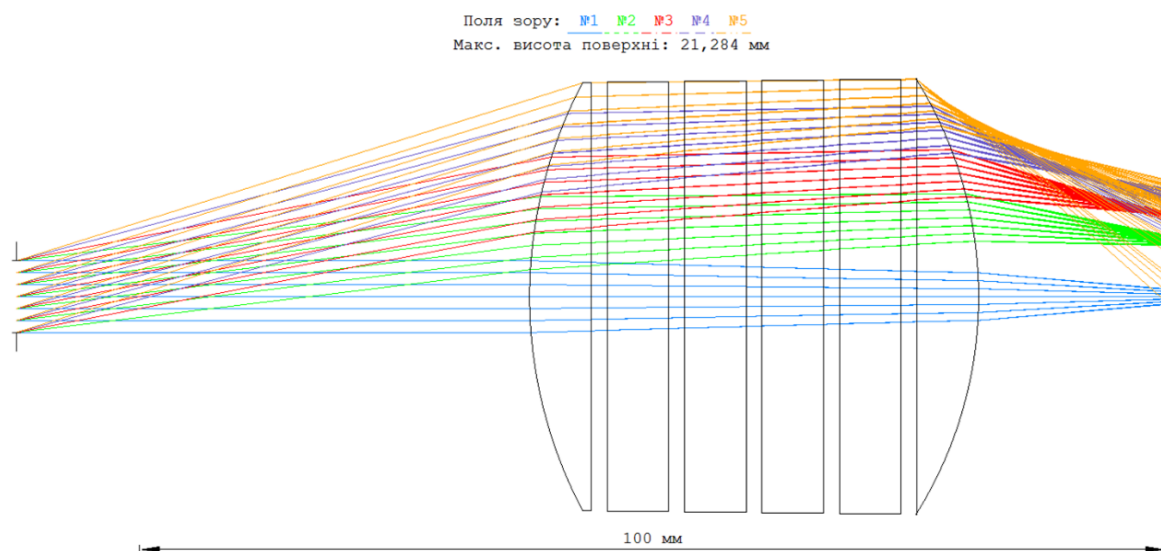


Рис. 2. Початкова оптична система з плоско-паралельних пластинок

З метою скорочення часу, потрібного для параметричного синтезу, увесь процес розрахунку проводився в два етапи. На першому етапі встановлювалася оціночна функція для мінімізації функції деформації хвильового фронту з пошуком найкращих марок скла. При цьому алгоритмом глобальної оптимізації досліджувався увесь заданий багатовимірний простір пошукових з розміром популяції 100 на кожну змінну. Така процедура потребувала декількох годин роботи програми.

На другому (завершальному) етапі оціночна функція складалася вже для поліпшення значень поліхроматичної модуляційної передавальної функції для різних точок поля зору та просторової частоти 50 ліній/мм. Під час цього розрахунку розмір популяції був зменшений до 30. Результати отриманої системи представлені на рис. 3.

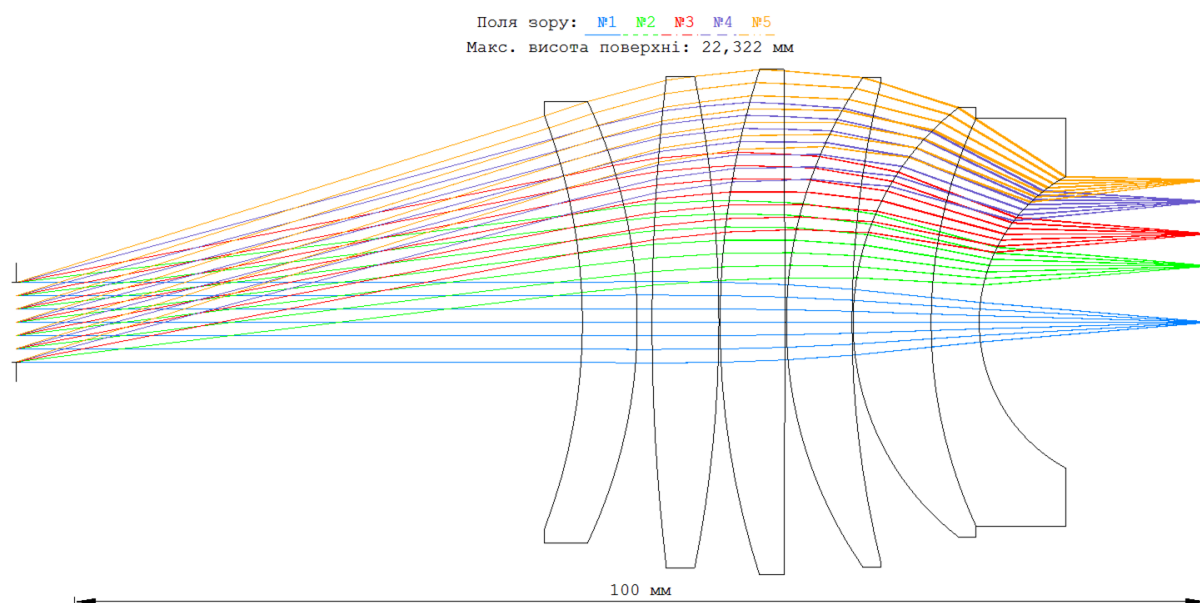


Рис. 3. Оптична схема розрахованого окуляра з ходом осьових та позаосьових променів

Якість зображення отриманої ОС можна оцінити за точковими діаграмами, показаними на рис. 4, та графіками поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, приведеними на рис. 5 для різних точок поля зору.

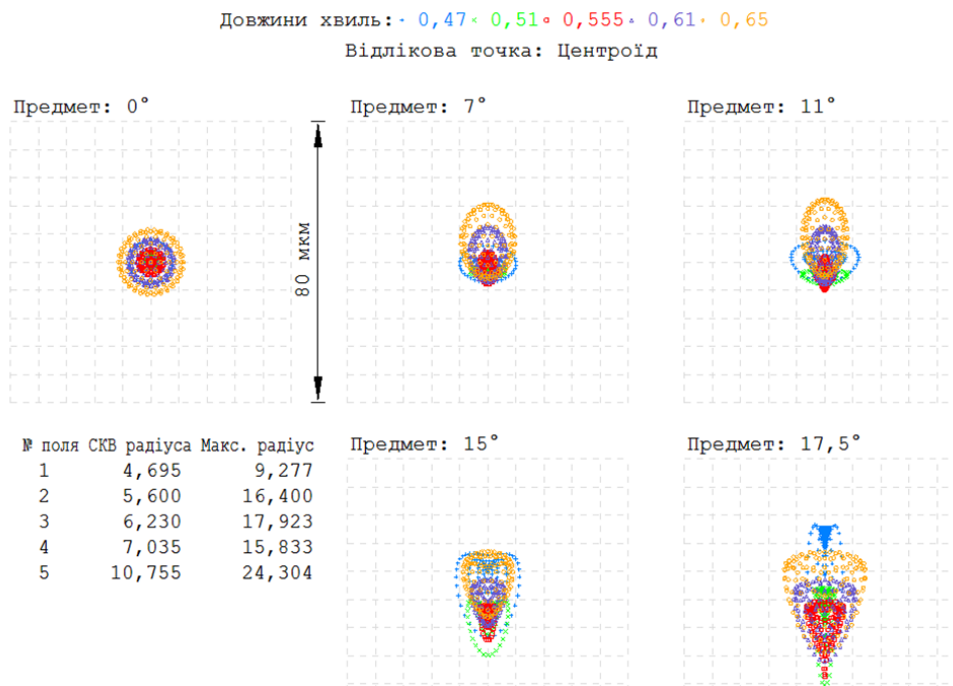


Рис. 4. Точкові діаграми синтезованого окуляра

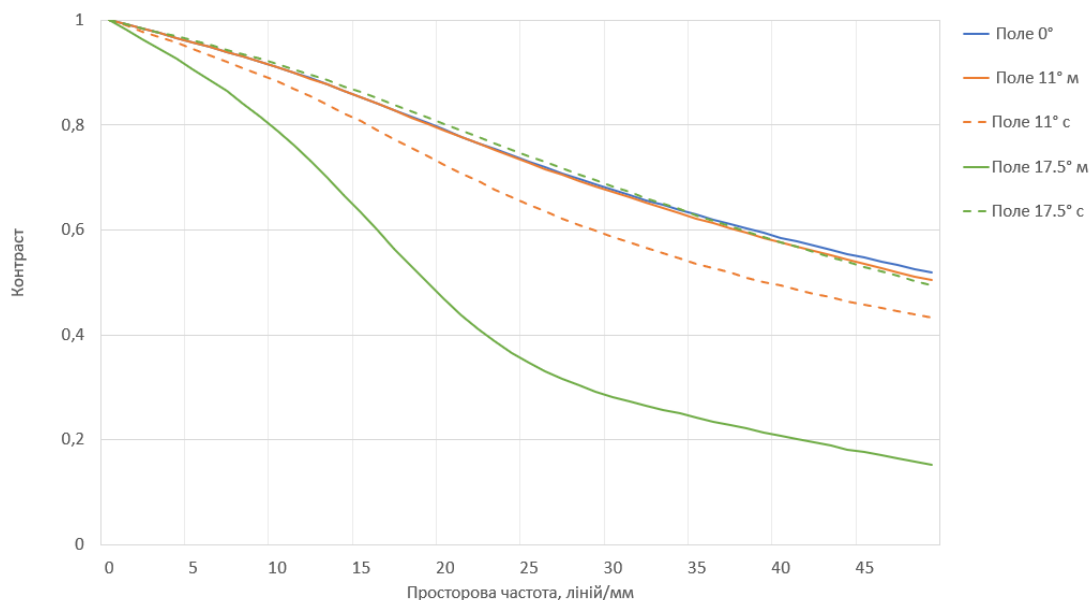


Рис. 5. Графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій розробленого окуляра для різних точок поля зору: суцільні криві – для меридіональної площини; пунктирні – для сагітальної

Висновки

Приведений параметричний синтез оптичної системи шестилінзового окуляра для мікродисплея з високим просторовим розділенням підтверджує на практиці можливість здійснення автоматизованому розрахунку за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, призначеного для проектування оптичних систем з урахуванням заданих функціональних параметрів та конструктивних обмежень. Отримані результати свідчать, що синтезована оптична система окуляра має високу якість зображення. Перевагами розрахованого окуляра є суттєве кутове поле зору (35°), незначна дисторсія (не більше 2%) та велике віддалення зіниці (50 мм).

Література

1. Haas G. Microdisplays for Augmented and Virtual Reality. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2018. Vol. 49. No. 1, p. 506–509.
2. Underwood I. A review of microdisplay technologies. SID Seminar Notes. 2000.
3. Armitage D., Underwood I., Shin-Tson Wu. Introduction to Microdisplays. Wiley Series in Display Technology. 2006. 396 p.

4. Templier F. OLED Microdisplays: Technology and Applications. Wiley-ISTE. 2014. 286 p.
5. Слюсарев, Г.Г. Методы расчета оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л. : Машиностроение, 1969. – 672 с. : ил.
6. Русинов М.М. Композиция оптических систем / Русинов М.М. – Л. : Ленинградское отделение, 1989. – 383 с. : ил.
7. Kopin Unveils ‘Lightning’ 2k × 2k 120Hz OLED Microdisplay for Mobile VR. Kopin. 2019. URL: <https://www.roadtovr.com/kopin-unveils-lightning-2k-x-2k-120hz-oled-microdisplay-mobile-vr/>.
8. Yunnan OLiGHTeK Opto-Electronic Technology Products. OLiGHTeK. 2019. URL: <http://www.olightek.com/product.html>.
9. Zacuto Gratical HD EVF. Zacuto. 2019. URL: <http://www.olightek.com/product.html>.

References

1. Haas G. Microdisplays for Augmented and Virtual Reality. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2018. Vol. 49. No. 1, p. 506–509.
2. Underwood I. A review of microdisplay technologies. SID Seminar Notes. 2000.
3. Armitage D., Underwood I., Shin-Tson Wu. Introduction to Microdisplays. Wiley Series in Display Technology. 2006. 396 p.
4. Templier F. OLED Microdisplays: Technology and Applications. Wiley-ISTE. 2014. 286 p.
5. Slyusarev, G.G. Metody rascheta opticheskikh sistem / G.G. Slyusarev. – Izd. 2-e, dop. i pererab. – L. : Mashinostroenie, 1969. – 672 s. : il.
6. Rusinov M.M. Kompoziciya opticheskikh sistem / Rusinov M.M. – L. : Leningradskoe otdelenie, 1989. – 383 s. : il.
7. Kopin Unveils ‘Lightning’ 2k × 2k 120Hz OLED Microdisplay for Mobile VR. Kopin. 2019. URL: <https://www.roadtovr.com/kopin-unveils-lightning-2k-x-2k-120hz-oled-microdisplay-mobile-vr/>.
8. Yunnan OLiGHTeK Opto-Electronic Technology Products. OLiGHTeK. 2019. URL: <http://www.olightek.com/product.html>.
9. Zacuto Gratical HD EVF. Zacuto. 2019. URL: <http://www.olightek.com/product.html>.

Рецензія/Peer review : 14.12.2019 р.

Надрукована/Printed : 16.01.2020

Рецензент: д.т.н., проф. Боровицький В.М.