

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 681.782

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОРТОСКОПІЧНИХ АСФЕРИЧНИХ  
ДЗЕРКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТИВІВ КОРША ДЛЯ НАНОСУПУТНИКІВ**<sup>1)</sup>Сокурєнко В. М., <sup>2)</sup>Сокурєнко О. М.<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

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

<sup>2)</sup>ВСП «Оптико-механічний фаховий коледж Київського національного університету імені Тараса Шевченка», Київ, УкраїнаE-mail: [sokurenko2@meta.ua](mailto:sokurenko2@meta.ua)

У даній роботі представлено результати автоматизованого параметричного синтезу серії ортоскопічних асферичних оптичних систем дзеркальних об'єктивів з різною фокусною відстанню, побудованих за схемою Корша. З метою забезпечення компактності конструкції розглянуті об'єктиви містять по три дзеркала з асферичними поверхнями другого порядку та три нахилених плоских дзеркала. Отримані оптичні системи мають фокусну відстань від 480 мм до 960 мм, кутове поле зору від 1,2° до 2,4°, діафрагмове число від 6 до 12, вхідну апертуру діаметром 80 мм та осьову довжину не більшу за 170 мм, що не перевищує розмір CubeSat 2U. У всіх розглянутих системах максимальний лінійний розмір чутливої площадки приймача зображення дорівнює 20 мм. Синтезовані дзеркальні системи не мають хроматичних аберацій, що дозволяє отримувати зображення у видимому та декількох інфрачервоних піддіапазонах. Наведені результати абераційного аналізу свідчать про високу якість зображення отриманих оптичних систем. Зокрема, для довжини хвилі 0,546 мкм значення дифракційних модуляційних передавальних функцій в меридіональній та сагітальній площинах по всьому полю у всіх системах перевищують 0,53 для просторової частоти 30 мм<sup>-1</sup> та 0,3 для просторової частоти 50 мм<sup>-1</sup>. Максимальне значення відносної дисторсії розрахованих об'єктивів становить 0,005 %, що в абсолютній мірі відповідає зміщенню 0,5 мкм. Представлені об'єктиви здатні охопити смугу спостереження земної поверхні з лінійним розміром від 12,6 до 25,1 км з висоти траси супутника 600 км. При використанні багатоелементного приймача випромінювання з розміром пікселів 5 мкм та досягненні дифракційно-обмеженої якості зображення об'єктивів як геометрична, так і дифракційна межа розділення на земній поверхні не перевищуватимуть 10 м.

**Ключові слова:** дзеркальний об'єктив; телескоп Корша; наносупутник; CubeSat; дистанційне зондування Землі; дисторсія; аберації.

**Вступ**

Серед супутників для астрономічних досліджень і спостереження за Землею дедалі спостерігається все більший перехід від великих платформ надзвичайно великої вартості до значно менших за розмірами та принципово дешевших мікросупутників і наносупутників, побудованих із застосуванням передової мікроелектроніки, високоякісних оптичних систем та матеріалів [1 - 3].

Сучасні наносупутники будуються за стандартизованою конфігурацією. Зазвичай, вони містять 1, 2, 3, 6, 12 або навіть 16 модулів з розміром кожного 10×10×10 см<sup>3</sup> (формат «U»). Однак, така компактна конструкція призводить до необхідності вирішення низки наукових та інженерних задач.

Однією із найскладніших задач є розроблення надкомпактної оптичної системи для наносупутників з високою роздільною здатністю (1-2 кутові секунди) та широким полем огляду (в декілька

градусів) [4]. Задача може ще більше ускладнюватися, якщо висувається додаткова вимога отримання зображень в різних спектральних діапазонах. Детальна спектральна інформація важлива для дистанційного зондування сільськогосподарських угідь, пошуку корисних копалин, моніторингу наслідків надзвичайних ситуацій тощо.

**Постановка задачі досліджень**

Основна мета даної роботи – перевірка потенційних можливостей асферичних тридзеркальних об'єктивів Корша з великою фокусною відстанню та повздовжнім розміром не більше двох модулів (2U). На відміну від більш складних оптичних систем, що містять поверхні довільної форми [5, 6], схеми з трьома осесиметричними асферичними поверхнями другого порядку є більш простими, технологічними та компактними, що важливо для наносупутників. Нижче засобами автоматизовано-

го проектування буде здійснено параметричний синтез серії таких оптичних систем з різними функціональними параметрами без застосування будь-яких попередніх абераційних розрахунків та використання якісних стартових систем.

### Загальна будова дзеркального об'єктива Корша для наносупутника

В цій статті пропонується здійснити автоматизований параметричний синтез та дослідити абераційні властивості серії оптичних систем об'єктивів-рефлекторів з різною фокусною від-

станню та відносним полем, побудованих за схемою Корша.

Загальна будова асферичного дзеркального об'єктива Корша представлена схематично на рис 1. Оптична система об'єктива містить три асферичних дзеркала другого порядку і три нахилених плоских дзеркала для заломлення пучків та забезпечення компактності конструкції. Перше з плоских дзеркал має центральний отвір для проходження світлових пучків від попередньої оптичної підсистеми.

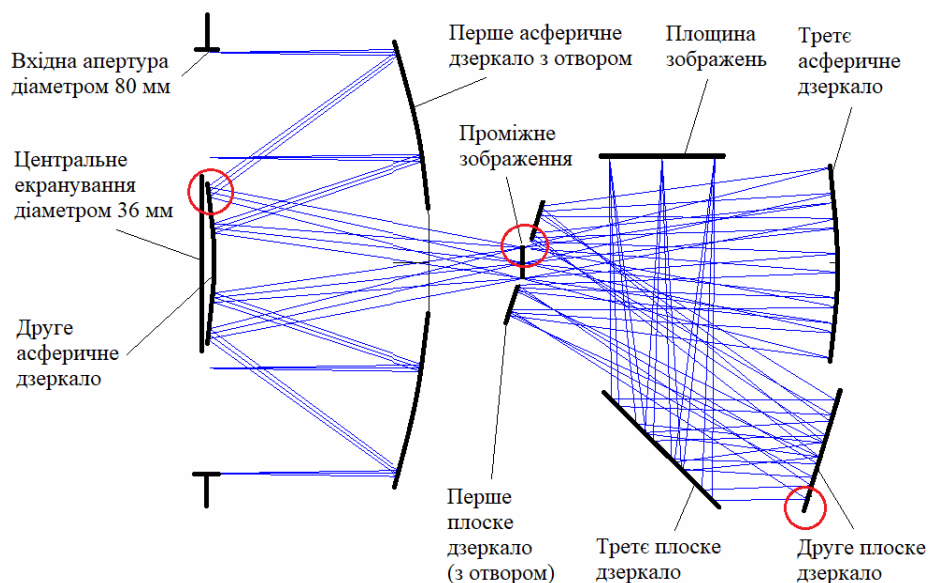


Рис. 1. Структурна схема дзеркального об'єктива Корша. Червоним колом показані місця, в яких потрібно під час автоматизованого розрахунку додатково контролювати координати променів по вертикалі

Перевагами розглянутої дзеркальної схеми є компактність конструкції, можливість досягнення великої фокусної відстані оптичної системи та відсутність хроматичних аберацій. Ці переваги сприяють можливості отримання зображень в різних спектральних діапазонах.

Моніторинг та збір такої інформації дозволяє здійснювати аналіз сільськогосподарських угідь, оцінювати стан врожаю, виявляти лісові покриття, інспектувати вологість ґрунтів та відстежувати їх зміни. Супутники з таким функціоналом часто виявляються незамінним інструментом для пошуку корисних копалин, контролю кар'єрів та відслідковування наслідків надзвичайних ситуацій, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози та забезпечувати безпеку населення та довкілля [7 - 9].

Стандартизований габаритний розмір наносупутника є основним конструктивним обмеженням для оптичної системи телескопа-рефлектора. При використанні двох модулів (2U) максимальний розмір конструкції об'єктива не повинен перевищувати простір 90×90×190 мм.

### Формування оптимізаційної моделі

В даній роботі для параметричного синтезу оптичних систем був застосований еволюційний алгоритм глобальної оптимізації. Під час моделювання параметрами оптимізації (тобто оптимізаційними змінними) були вибрані радіуси кривизни трьох асферичних дзеркал, їх кінчні коефіцієнти та осеві відстані між оптичними поверхнями, включаючи положення зображення. Осеві відстані між плоскими дзеркалами не оптимізувалися, а встановлювалися фіксованими вже для синтезованих систем для найбільш компактного розташування дзеркал всередині корпусу наносупутника. У всіх розглянутих оптичних системах вхідна апертура дорівнювала 80 мм, а діаметр центрального екрану – 36 мм. Загальна кількість пошукових змінних становила 8.

Для досягнення максимальної якості зображення була сформована оціночна функція, що мінімізує середньоквадратичні радіуси світлових плям для осевого пучка для чотирьох предметних точок з відносними координатами: 0, 0,5, 0,71 і 1. Максимальне допустиме значення відносної дисторсії об-

межувалося на рівні 0,005 %. Кут нахилу плоского дзеркала з отвором коригувався в межах від 10° до 20° з конструктивних міркувань для уникнення просторового конфлікту між деталями дзеркала.

Перші два асферичних дзеркала об'єктива утворюють проміжне дійсне зображення, яке має потрапляти всередину центрального отвору першого нахиленого плоского дзеркала з отвором (див. рис. 1). Тому для забезпечення належного проходження променів в оціночній функції додатково обмежувалася мінімальна різниця (значенням 1 мм) між координатами по вертикалі головного променя периферійного пучка на проміжному зображенні та променя з відносною зінічною координатою  $18 / 40 = 0,45$  на цьому дзеркалі.

Основні функціональні параметри серії дзеркальних об'єктивів, що підлягали в даній роботі автоматизованому синтезу, наведені в табл. 1. Всі оптичні системи розраховувалися для максималь-

ного лінійного розміру приймача зображення, що дорівнював 20 мм. При висоті траси супутника 600 км лінійний розмір ділянки земної поверхні, що охоплюється в зображенні, становитиме від 12,6 до 25,1 км.

Представлені в табл. 1 числові параметри дають змогу оцінити лінійне розділення на земній поверхні, яке потенційно може бути досягнуте. Так, при висоті траси супутника 600 км та використанні багатоелементного приймача випромінювання з розміром пікселів 5 мкм, геометрична проєкція одного пікселя на земну поверхню для розглянутих варіантів об'єктивів дорівнюватиме від 2,9 м до 6,3 м (див. табл. 2). Проте слід враховувати, що при заданих параметрах згідно з критерієм Релея через явище дифракції елемент розділення на поверхні Землі для довжини хвилі 0,546 мкм не може бути меншим за 5 м.

Таблиця 1. Функціональні параметри серії об'єктивів Корша для наносупутників

№ п/п	Задня фокусна відстань, мм	Діаметр вхідної зініці, мм	Діафрагмове число	Кутове поле зору в просторі предметів, °	Лінійне поле зору в площині зображень, мм	Лінійне поле зору на поверхні Землі при висоті траси 600 км, км
1	480	80	6	2,4	20	25,1
2	є	80	7	2,05	20	22
3	640	80	8	1,8	20	18,9
4	720	80	9	1,6	20	16,8
5	800	80	10	1,44	20	15,1
6	880	80	11	1,3	20	13,6
7	960	80	12	1,2	20	12,6

Таблиця 2. Оцінка роздільної здатності серії об'єктивів Корша при висоті траси 600 км

№ п/п	Задня фокусна відстань, мм	Діафрагмове число	Розмір геометричної проєкції одного пікселя шириною 5 мкм на поверхні Землі, м	Радіус кружка Ейрі для дифракційно-обмеженого об'єктива та довжини хвилі 0,546 мкм, мкм	Оцінка розміру елемента розділення на поверхні Землі по критерію Релея для довжини хвилі 0,546 мкм, м
1	480	6	6,3	4	5
2	560	7	5,4	4,7	5
3	640	8	4,7	5,4	5
4	720	9	4,2	6	5
5	800	10	3,8	6,7	5
6	880	11	3,4	7,4	5
7	960	12	3,1	8,1	5

#### Параметричний синтез асферичних оптичних систем дзеркальних об'єктивів

Для розрахунку конструктивних параметрів серії дзеркальних об'єктивів з різною фокусною відстанню була використана комп'ютерна програма PODIL, призначена для автоматизованого проєктування оптичних систем. Програма дозволяє провести аналіз, синтез й оптимізацію різноманітних оптичних систем [10 - 13].

В табл. 3 представлені результати проведеного автоматизованого синтезу ряду асферичних дзеркальних об'єктивів Корша з різною фокусною відстанню для наносупутників.

Як приклад однієї з отриманих оптичних систем, на рис. 2 представлений тривимірний вигляд об'єктива з фокусною відстанню 640 мм. Його конструктивні параметри наведені в табл. 4.

На рис. 3 – рис. 5 зображені точкові діаграми, графіки функцій концентрації енергії та графіки ди-

фракційних модуляційних передавальних функцій синтезованої системи для різних точок поля зору.

Таблиця 3. Параметри якості зображення синтезованих оптичних систем об'єктивів Корща для наносупутників

№ п/п	Задня фокусна відстань, мм	Відносна дисторсія, %	Діапазон значень дифракційних модуляційних передавальних функцій об'єктива в меридіональній та сагітальній площинах по всьому полю для довжини хвилі $\lambda = 0,546 \text{ мкм}$		Повздовжній розмір об'єктива, мм
			для просторової частоти $30 \text{ мм}^{-1}$	для просторової частоти $50 \text{ мм}^{-1}$	
1	480	0,005	0,56...0,77	0,30...0,63	105
2	560	0,005	0,70...0,79	0,41...0,66	108
3	640	0,005	0,66...0,77	0,41...0,61	125
4	720	0,005	0,63...0,74	0,40...0,58	129
5	800	0,005	0,60...0,73	0,36...0,55	148
6	880	0,005	0,56...0,69	0,33...0,49	167
7	960	0,005	0,53...0,67	0,31...0,46	169

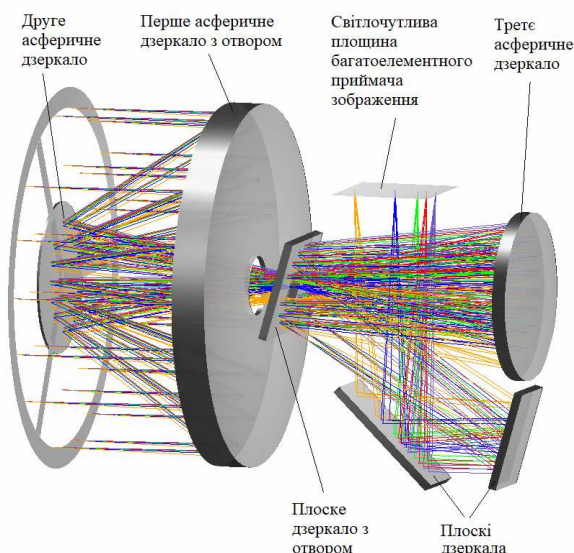


Рис. 2. Тривимірний вигляд синтезованої оптичної системи дзеркального об'єктива з фокусною відстанню 640 мм (на рисунку обмежувальні бленди не показані)

З урахуванням наявного центрального екранування перепад значень функції деформації хвильового фронту для осевого пучка та довжини хвилі  $0,54607 \text{ мкм}$  не перевищує  $0,1 \lambda$ , а її середньоквадратичне значення –  $0,03 \lambda$ . Ці результати свідчать про досягнуту в центрі поля зору дифракційно-обмежену якість зображення. На краю поля зору перепад значень функції деформації хвильового фронту дорівнює  $0,67 \lambda$ , а середньоквадратичне значення –  $0,15 \lambda$ .

З табл. 3 та рис. 5 видно, що для довжини хвилі  $0,546 \text{ мкм}$  контраст зображення на просторовій частоті  $50 \text{ ліній/мм}$  по всьому полю предметів в меридіональній та сагітальній площинах знаходиться в межах  $0,3...0,66$ .

Результати абераційного аналізу також показують, що представлені в даній роботі оптичні системи є практично ортоскопічними. Так, у всіх об'єктивах значення відносної дисторсії не перевищують  $0,005 \%$ , що в абсолютній мірі відповідає  $0,5 \text{ мкм}$ .

Таблиця 4. Конструктивні параметри дзеркального об'єктива з фокусною відстанню 640 мм

Номер оптичної поверхні	Радіус поверхні, мм	Оськова товщина, мм	Конічний коефіцієнт	Примітка
1	$\infty$	43,638		Вхідна апертура діаметром 80 мм
2	-123,638	-41,638	-0,967	Перше асферичне (витягнуте еліптичне) дзеркало
3	-61,076	59,509	-3,804	Друге асферичне (гіперболічне) дзеркало
4	$\infty$	60,884		Площина проміжного дійсного зображення
5	-61,076	-60,884	-0,486	Третє асферичне (гіперболічне) дзеркало
6	$\infty$	66,973		Перше плоске дзеркало (з центральним отвором)
7	$\infty$	-30,442		Друге плоске дзеркало
8	$\infty$	55,479		Третє плоске дзеркало
9	$\infty$			<b>Площина зображень</b>

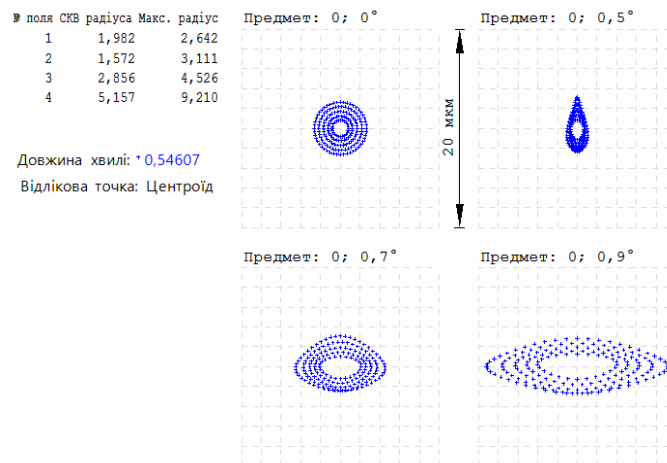
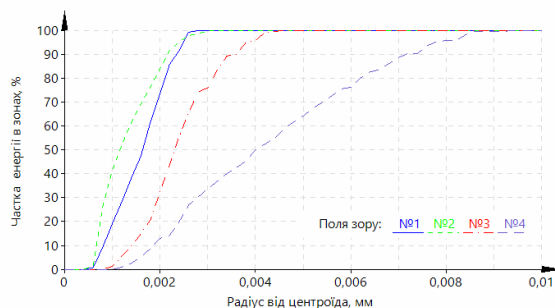
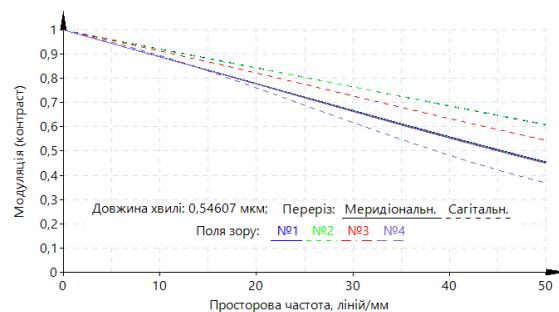


Рис. 3. Точкові діаграми об'єктива з фокусною відстанню 640 мм

Рис. 4. Геометрична функція концентрації енергії в квадратних зонах об'єктива з фокусною відстанню 640 мм. Поля зору №1-4 відповідають предметним точкам з кутковими координатами  $0^\circ$ ,  $0,5^\circ$ ,  $0,7^\circ$  і  $0,9^\circ$ Рис. 5. Дифракційні модуляційні передавальні функції об'єктива з фокусною відстанню 640 мм, розраховані для довжини хвилі 0,546 мкм. Поля зору №1-4 відповідають предметним точкам з кутковими координатами  $0^\circ$ ,  $0,5^\circ$ ,  $0,7^\circ$  і  $0,9^\circ$ 

## Висновки

Отримано конструктивні параметри ортоскопічних дзеркальних об'єктивів з фокусною відстанню від 480 до 960 мм для супутників формату CubeSat. Розроблені варіанти оптичних систем побудовані за схемою Корша з урахуванням наявних конструктивних обмежень. Об'єктиви містять по три дзеркала з асферичними поверхнями 2-го порядку та три плоских дзеркала для забезпечення компактності конструкції. Конструктивно розглянуті об'єктиви потребують для свого розміщення два модулі формату U. Вони можуть бути використані з багатоеlementними приймачами випромінювання з максимальним лінійним розміром 20 мм в зразках наносупутників з форм-фактором 3U.

Результати розрахунку показують, що для довжини хвилі 0,546 мкм значення дифракційних модуляційних передавальних функцій в меридіональній та сагітальній площинах по всьому полю всіх об'єктивів перевищують 0,53 для просторової частоти  $30 \text{ мм}^{-1}$  та 0,3 для просторової частоти  $50 \text{ мм}^{-1}$ . При висоті траси супутника 600 км теоретично можна отримати зображення ділянки земної поверхні з лінійним розміром від 12,6 до 25,1 км та лінійною межею розділення, меншою за 10 м.

Наступні дослідження раціонально зосередити на пошуку та розробці компактних схем оптичних систем для наносупутників, які б забезпечували ширше кутове поле зору та вищу роздільну здатність.

## Література

- [1] E. L. Shkolnik, "On the verge of an astronomy CubeSat revolution," *Nature Astronomy* 2, pp. 374–378, 2018. DOI: 10.1038/s41550-018-0438-8.
- [2] E. E. Areda, J. R. Cordova-Alarcon, H. Masui, M. Cho, "Development of Innovative CubeSat Platform for Mass Production," *Appl. Sci.*, 12, 9087, 2022. DOI: 10.3390/app12189087.
- [3] D. Khramov, "Миниатюрные спутники стандарта CubeSat", *Космична наука і технологія*, № 15, с. 20–31, 2009.
- [4] M. Tumarina, M. Ryazanskiy, S. Jeong, G. Hong, N. Vedenkin, I. H. Park, and A. Milov, "Design, fabrication and space suitability tests of wide field of view, ultra-compact, and high resolution telescope for space application", *Opt. Express*, 26, 2390-2399, 2018.
- [5] S. Risse, A. Gebhardt, C. Damm, Thomas Peschel, W. Stöckl, T. Feigl, Steffen Kirschstein,

- R. Eberhardt, Nicholas Kaiser, A. Tünnermann, "Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors", *Proc SPIE*, 2008. DOI: 10.1117/12.789824.
- [6] Tong Yang, Guo-Fan Jin and Jun Zhu, "Automated design of freeform imaging systems", *Light: Science & Applications*, (2017) 6, e17081; DOI: 10.1038/lsa.2017.81.
- [7] С. С. Кохан, А. Б. Востоков, *Дистанційний моніторинг земельних ресурсів*. Навч. посібник. Київ: ЦП «Компринт», 2018.
- [8] Б. В. Четверіков, І. В. Калинич, *Методика застосування даних дистанційного зондування землі в оцінці наслідків надзвичайних ситуацій*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022.
- [9] В. Г. Колобродов, І. В. Кравченко, В. І. Микитенко, *Розроблення та контроль автоматизованих оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі*: монографія. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського; Інтерсервіс, 2021.
- [10] В. М. Сокурєнко, О. Є. Стріха, "Розробка об'єктивів з виправленою дисторсією", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 99-105, 2017.
- [11] В. М. Сокурєнко, Д. П. Бондарчук, "Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива зі зменшеною дисторсією", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування*, № 56(2), с. 18-24, 2018.
- [12] В. М. Сокурєнко, І. О. Смажко, "Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об'єктива", *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*, №6 (279), с. 202-205, 2019. DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-202-205.
- [13] В. М. Сокурєнко, І. Т. Хуторовий, О. М. Сокурєнко, "Розроблення оптичних систем 16-лінзових ортоскопічних телеоб'єктивів", *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, № 6, 2022 (315), с. 219-223, 2022. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-315-6-219-223.

UDC 681.782

## AUTOMATED DESIGN OF KORSCH ORTHOSCOPIC ASPHERICAL MIRROR TELESCOPES FOR NANOSATELLITES

<sup>1)</sup>V. M. Sokurenko, <sup>2)</sup>O. M. Sokurenko<sup>1)</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine<sup>2)</sup>Optical and mechanical professional college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

This study presents the results of an automated parametric synthesis of a series of orthoscopic aspheric optical systems of mirror telescopes with different focal lengths, built according to the Korsch scheme. In order to ensure compactness of the design, these systems consist of three second-order aspheric mirrors and three folded flat mirrors. The obtained optical systems have a focal length ranging from 480 mm to 960 mm, an angular field of view ranging from 1.2° to 2.4°, an aperture number ranging from 6 to 12, an entrance aperture with a diameter of 80 mm, and an axial length of no more than 170 mm, which is within the dimensions of a 2U CubeSat. The maximum linear size of the image detector's sensitive area is 20 mm in all considered systems. The mirror telescopes do not have chromatic aberrations, enabling the capture of images within the visible spectrum and multiple infrared sub-bands. The provided aberration analysis demonstrates the high image quality of the considered optical systems. Specifically, for a wavelength of 0.546 μm, the diffraction modulation transfer function values both in the meridional and sagittal planes across the entire field exceed 0.53 for a spatial frequency of 30 mm<sup>-1</sup>, and 0.3 for a spatial frequency of 50 mm<sup>-1</sup>. The maximum relative distortion in the designed systems is 0.005%, corresponding to an absolute displacement of 0.5 μm. The presented telescopes are capable of covering an observation band of Earth's surface with linear dimensions ranging from 12.6 km to 25.1 km when a satellite track height is 600 km. By applying multi-element image detectors with a pixel size of 5 μm and achieving diffraction-limited image quality in the optical systems, both the geometric and diffraction resolution limits on Earth's surface will not exceed 10 m.

**Keywords:** mirror system; Korsch telescope; nanosatellite; CubeSat; remote sensing of Earth; distortion; aberrations.

Надійшла до редакції  
07 червня 2023 року

Рецензовано  
18 серпня 2023 року



© 2023 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).