

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

УДК 681.782

**АСФЕРИЧНІ ДВОДЗЕРКАЛЬНІ ОБ'ЄКТИВИ НАНОСУПУТНИКІВ
ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА ПОШУКУ КОРИСНИХ
КОПАЛИН**¹⁾Сокурєнко В. М., ²⁾Сокурєнко О. М.¹⁾Національний технічний університет України

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

²⁾ВСП «Оптико-механічний фаховий коледж

Київського національного університету імені Тараса Шевченка», Київ, Україна

E-mail: sokurenko2@meta.ua

Оптична система об'єктива є однією з важливих складових частин будь-якого космічного супутника, що використовується для спостереження поверхні Землі або астрономічних об'єктів. Через малий загальний розмір наносупутників в них часто застосовують лінзові об'єктиви з відносно невеликою фокусною відстанню. Останнє забезпечує достатньо широке поле зору, але обмежує просторову роздільну здатність отриманих зображень. Крім того, для вирішення задач сільськогосподарства та геодезії важливо отримувати фотознімки земної поверхні в різних спектральних діапазонах. Ця обставина обмежує застосування розповсюджених комерційних фотооб'єктивів, скоригованих для видимого спектрального діапазону.

У цій статті представлено результати автоматизованого параметричного синтезу центрованої і децентрованої асферичних оптичних систем дзеркальних об'єктивів, побудованих за схемою Річі-Кретьєна. Отримані оптичні системи мають фокусну відстань 547 мм, квадратну вхідну апертуру 80×80 мм та осьову довжину, що не перевищує розмір CubeSat 2U. Кутове поле зору об'єктивів, яке дорівнює 0,7° по діагоналі, дозволяє використовувати сучасні матричні приймачі зображення з діагоналлю чутливої площадки до 6,7 мм. Для осьового пучка 90 % енергії випромінювання потрапляє в квадратну ділянку зображення зі стороною 2,5 мкм. Максимальне значення відносної дисторсії не перевищує 0,4 %. Розглянуті дзеркальні системи не мають хроматичних аберацій, що дозволяє отримувати зображення високої якості не лише у видимому спектральному діапазоні, але й в декількох інфрачервоних піддіапазонах.

Наведені результати абераційного аналізу свідчать про високу якість зображення, досягнуту в обох варіантах. Представлені оптичні системи здатні охопити прямокутну ділянку земної поверхні з діагональним розміром біля 7,9 км з висоти траси супутника 650 км. При використанні багатоелементного приймача випромінювання з розміром пікселів 3 мкм, геометрична проєкція одного пікселя на земну поверхню становитиме 3,6 м.

Ключові слова: наносупутник; CubeSat; дистанційне зондування Землі; об'єктив-рефлектор; телескоп Річі-Кретьєна; дисторсія; аберації.

Вступ

Платформа CubeSat є стандартизованою конфігурацією для наносупутників [1, 2]. Такі супутники складаються з одного або декількох кубічних модулів з розміром кожного 10×10×10 см³ (формат «U») та масою до 1,33 кг. В основному, космічні місії сучасних наносупутників використовується для проведення прикладних наукових досліджень, спостереження за поверхнею Землі та рідше зоряними об'єктами.

Значна кількість оптичних систем сучасних наносупутників, розроблених для отримання зображень, базується на використанні заломлюючої

багатолінзової оптики. Для цього переважно застосовуються доступні комерційні зразки фотооб'єктивів. Незважаючи на значну світлосилу та високу якість корекції монохроматичних та хроматичних аберацій, лінзова оптика може мати суттєві недоліки. Серед них – значна маса, ефект потемніння скляних лінз під дією космічного випромінювання, можливість виникнення небажаних децентрувань та нахилів її внутрішніх компонентів, спричинених вібраціями та термічним впливом. Крім того, відносно невелика фокусна відстань лінзових систем обмежує геометричну роздільну здатність отриманих зображень, а для використан-

ня довгофокусних телеоб'єктивів замало вільного простору наносупутника.

Для дистанційного зондування сільськогосподарських поверхонь та пошуку корисних копалин потрібно застосовувати оптичні системи, що формують зображення в різних спектральних діапазонах. Проте, на жаль, спектральний діапазон більшості комерційних зразків фотооб'єктивів, зазвичай, обмежений видимим спектром. Тому наразі для наносупутників вказаного призначення існує потреба у розробці довгофокусних оптичних систем, здатних забезпечувати високу якість зображень в різних спектральних діапазонах.

Постановка задачі

Основна мета даної роботи – перевірка можливості досягнення високої якості зображення в невеликих асферичних дзеркальних об'єктивах з повздовжнім розміром не більше двох модулів (2U). Подібний підхід був раніше використаний в роботах [3, 4]. На відміну від більш складних конструкцій та оптичних систем, що містять поверхні довільної форми [5-8], дводзеркальні схеми з асферичними поверхнями другого порядку є більш простими, технологічними та компактними, що важливо для наносупутників. Нижче засобами автоматизованого проектування будуть згенеровані конструктивні параметри таких оптичних систем.

Загальна структура оптичної системи об'єктива наносупутника

В цій статті пропонується розробити та дослідити абераційні властивості двох різновидів оптичних систем об'єктивів-рефлекторів, побудованих за схемою Річі-Кретьєна. Як відомо, така схема передбачає застосування двох асферичних дзеркал другого порядку [3]. Асферичні поверхні обох дзеркал є гіперболічними, хоча профіль огинаючої основного (першого) дзеркала є близьким до параболічного.

Додатково, для поліпшення якості зображення може бути залучений компенсатор з декількох лінз, який зазвичай встановлюється перед площиною зображень.

Перевагами дводзеркальної схеми є компактність конструкції, можливість досягнення великої фокусної відстані оптичної системи та відсутність хроматичних аберацій. Остання перевага сприяє застосуванню наносупутника з оптичною схемою, побудованою за схемою Річі-Кретьєна, в різних спектральних діапазонах для аналізу сільськогосподарських угідь, виявлення лісових покривів, інспекції вологості ґрунтів, моніторингу кар'єрів, оцінки стану врожаю, пошуку корисних копалин, відстежування наслідків надзвичайних ситуацій тощо [9-11].

Основним конструктивним обмеженням для оптичної системи телескопа-рефлектора є внутрішній простір, доступний всередині наносупутника.

Дійсно, при використанні двох модулів для дзеркального об'єктива максимальний дозволений простір для нього не повинен перевищувати 90×90×190 мм. Більш того, з урахуванням деталей, потрібних для кріплення основного (первинного) дзеркала, поперечні розміри об'єктива не повинні перевищувати квадратну апертуру зі стороною 80 мм.

Формування оптимізаційної моделі

Будь-яка оптимізаційна модель передбачає вибір параметрів оптимізації, формування оціночної функції та встановлення додаткових обмежень.

В даному чисельному дослідженні параметрами оптимізації були вибрані радіуси кривизни та кіничні коефіцієнти обох дзеркал об'єктива наносупутника, децентрування поверхонь цих дзеркал по вертикалі та величина віддалення площини зображень від другого дзеркала. Таким чином, загальна кількість пошукових змінних становила 7.

Для досягнення високої якості зображення була сформована оціночна функція, що мінімізує середньоквадратичні радіуси світлових плям для осевого пучка та 16-ть позаосевих предметних точок, розташованих по всьому полю. Додатково з конструктивних міркувань обмежувалися (в діапазонах по декілька мм) координати по вертикалі головного променя осевого пучка на другому дзеркалі та в площині зображень. На рис. 1 ці дві точки показані, як Y_2 і Y_1 , відповідно. Останнє робилося для того, щоб деталь другого дзеркала і плата з багатоелементним приймачем зображення вміщувалися в стандартизований габаритний розмір наносупутника.

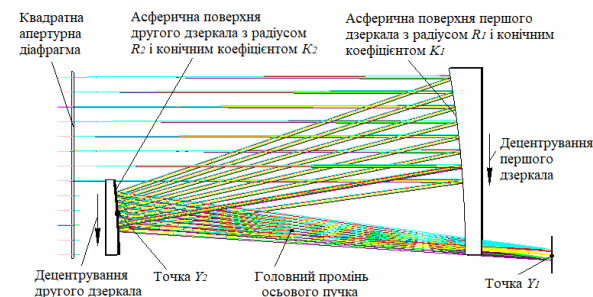


Рис. 1. Структурна схема децентрованої системи

Для визначення конструктивних параметрів об'єктива в автоматичному режимі була використана комп'ютерна програма PODIL, яка дозволяє здійснити аналіз, синтез та оптимізацію складних багатоелементних оптичних систем з асферичними, дифракційними та іншими типами поверхонь [12-15].

Нижче представлені результати проведеного розрахунку децентрованого і центрованого варіантів асферичного дзеркального об'єктива наносупутника.

Синтез децентрованої асферичної оптичної системи дводзеркального об'єктива

Основні функціональні параметри дзеркального об'єктива наносупутника, спільні для обох розроблених варіантів, наведені в табл. 1.

Представлені числові значення для фокусної відстані та розміру зображення дають змогу теоретично оцінити лінійний розмір ділянки земної поверхні, що охоплюється в кожному зображенні. Зокрема, при висоті траси супутника 650 км діагональ такої ділянки земної поверхні становитиме

7,9 км. При використанні багатоеlementного приймача випромінювання з розміром пікселів 3 мкм, геометрична проєкція одного пікселя на земну поверхню дорівнюватиме 3,6 м.

На рис. 2 представлений тривимірний вигляд отриманої децентрованої системи об'єктива. Вхідною апертурою є внутрішній квадратний отвір корпусу наносупутника. Світлова апертура основного дзеркала є квадратною зі стороною 80 мм. Форма вторинного дзеркала – прямокутна з розмірами 46×32 мм.

Таблиця 1. Основні функціональні параметри об'єктива наносупутника

Параметр	Значення
Тип об'єктива	Річі-Кретьєна
Кутове поле зору (по діагоналі)	0,7°
Діаметр кола зображень або максимальна діагональ багатоеlementного приймача випромінювання	6,7 мм
Осьова відстань між дзеркалами	150 мм
Розмір вхідної апертури	8×8 см
Задня фокусна відстань	547 мм

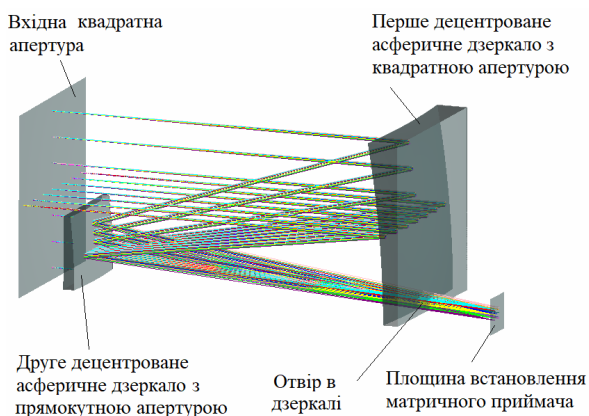


Рис. 2. Тривимірний вигляд синтезованої децентрованої системи (на рисунку обмежувальні бленди не показані)

Конструктивні параметри децентрованого варіанта оптичної системи об'єктива наведені в табл. 2.

З урахуванням наявного бічного екранування перепад значень функції деформації хвильового фронту для осьового пучка та довжини хвилі 0,54607 мкм не перевищує $0,2 \lambda$, а її середньоквадратичне значення – $0,04 \lambda$. Максимальне значення відносної дисторсії не перевищує 0,01 %.

На рис. 3 зображені графіки функцій концентрації енергії синтезованої децентрованої системи. Як видно, для осьового пучка 90 % світлової енергії потрапляє в квадратну зону зі стороною 2,5 мкм.

Таблиця 2. Конструктивні параметри децентрованого об'єктива наносупутника

Номер оптичної поверхні	Радіус, мм	Осьова товщина, мм	Конічний коефіцієнт	Децентрування по вертикалі, мм	Примітка
1	-453,459	150	-1,181	-37,994	Перше дзеркало
2	-262,184	185	-8,548	-37,986	Друге дзеркало

Як видно з графіків поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій, показаних на рис. 4, на просторовій частоті 50 ліній/мм контраст по всьому полю предметів перевищує 0,5.

Синтез центрованої асферичної оптичної системи дводзеркального об'єктива

Центрований варіант оптичної системи дводзеркального об'єктива можна отримати шляхом

усунення вертикальних децентрувань в раніше синтезованому децентрованому варіанті. На рис. 5 зображено тривимірний вигляд отриманої центрованої системи.

Незважаючи на те, що обидва варіанти мають ідентичні конструктивні параметри дзеркал та віддалення зображення, різне просторове розміщення оптичних поверхонь (через їх децентрування) зумовлює відмінності у якості зображення.

Зокрема, з урахуванням наявного центрального скранування перепад значень функції деформації хвильового фронту для осьового пучка та довжини хвилі 0,54607 мкм виявився 0,15 λ , а її середньоквадратичне значення – 0,032 λ . Максимальне значення відносної дисторсії не перевищує 0,4 %.

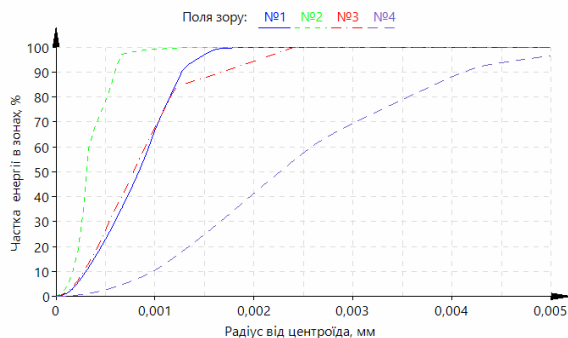


Рис. 3. Геометрична функція концентрації енергії в квадратних зонах децентрованої системи. Точки поля: №1 – осьова точка (0°; 0°); №2 – точка поля (0°; 0,18°); №3 – точка поля (0°; 0,25°); №4 – точка поля (0,25°; 0,25°)

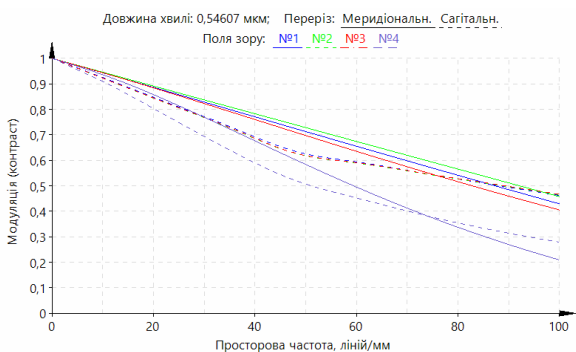


Рис. 4. Поліхроматичні дифракційні модуляційні передавальні функції децентрованої системи. Точки поля: №1 – осьова точка (0°; 0°); №2 – точка поля (0°; 0,18°); №3 – точка поля (0°; 0,25°); №4 – точка поля (0,25°; 0,25°)

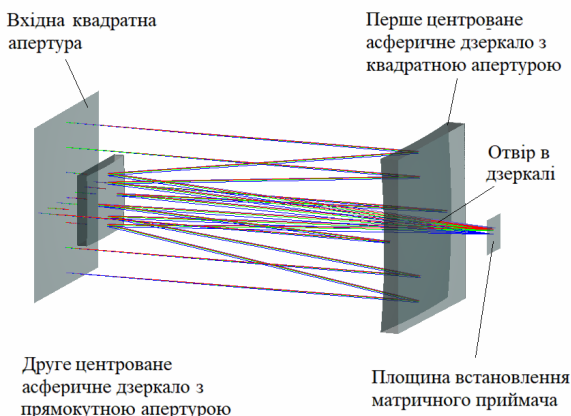


Рис. 5. Тривимірний вигляд центральної системи (на рисунку обмежувальні бленди не показані)

Графіки геометричних функцій концентрації енергії отриманої системи зображені на рис. 6. Як і в децентрованому варіанті, для осьового пучка 90 % світлової енергії потрапляє в квадратну ділянку приймача зображення зі стороною 2,5 мкм.

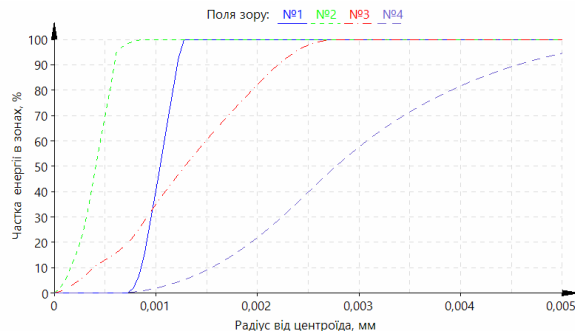


Рис. 6. Геометрична функція концентрації енергії в квадратних зонах центральної системи. Точки поля: №1 – осьова точка (0°; 0°); №2 – точка поля (0°; 0,18°); №3 – точка поля (0°; 0,25°); №4 – точка поля (0,25°; 0,25°)

Представлені на рис. 7 графічні залежності для поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій свідчать, що по всьому полю предметів на просторовій частоті 50 ліній/мм контраст перевищує 0,38. Це значення виявилось значно меншим порівняно зі випадком децентрованої системи.

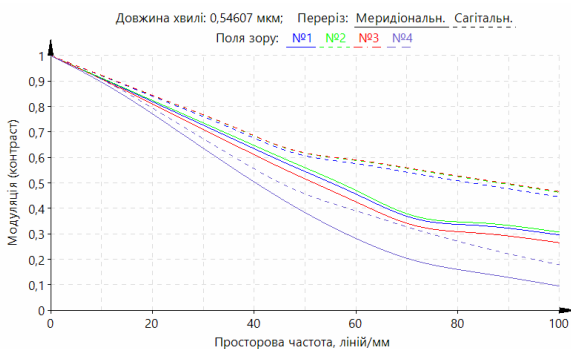


Рис. 7. Поліхроматичні дифракційні модуляційні передавальні функції центральної системи. Точки поля: №1 – осьова точка (0°; 0°); №2 – точка поля (0°; 0,18°); №3 – точка поля (0°; 0,25°); №4 – точка поля (0,25°; 0,25°)

Розміри світлових плям обох варіантів оптичних систем можна оцінити по значенням, наведеним в табл. 3.

Висновки

В цій статті отримано конструктивні параметри децентрованого та центрального варіантів дзеркального об'єктива для супутника формату CubeSat. Обидва варіанти побудовані за схемою

Річі-Кретьєна з урахуванням наявних конструктивних обмежень.

Синтезовані оптичні системи об'єктивів містять по два дзеркала з асферичними поверхнями 2-

го порядку, що мають квадратну і прямокутну форми світлових апертур.

Таблиця 3. Лінійні розміри світлових плям розсіювання

Варіант оптичної системи	Значення середньоквадратичного радіусу світлової плями, мкм	
	на оптичній осі	у кутовій точці поля зору
Децентрований	1,05	3,37
Центрований	1,18	3,95

Конструктивно розглянуті об'єктиви потребують два модулі формату U. Вони можуть бути використані з багатоелементними приймачами випромінювання з діагоналлю до 6,7 мм в зразках наносупутників з загальним розміром 3U.

Результати показують, що теоретично можна забезпечити отримання зображення ділянки земної поверхні з діагоналлю до 7,9 км з висоти 650 км. Подальші дослідження доцільно направити на пошук та розроблення удосконалених асферичних дзеркальних та дзеркально-лінзових оптичних систем для наносупутників, здатних при обмежених габаритних розмірах забезпечити більше кутове поле зору та вищу роздільну здатність.

Література

- [1] E. L. Shkolnik, "On the verge of an astronomy CubeSat revolution," *Nature Astronomy*, vol. 2, is. 5, pp. 374–378, 2018. DOI: 10.1038/s41550-018-0438-8.
- [2] E. E. Areda, J. R. Cordova-Alarcon, H. Masui, and M. Cho, "Development of Innovative CubeSat Platform for Mass Production", *Applied Sciences*, vol. 12, no 18, p. 9087, Sep. 2022. DOI: 10.3390/app12189087
- [3] Ho Jin, Juhee Lim, Youngju Kim, and Sanghyuk Kim, "Optical Design of a Reflecting Telescope for CubeSat," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 17, is. 6, pp. 533-537, 2013. DOI: 10.3807/JOSK.2013.17.6.533.
- [4] J. A. Ashcraft, et al. "The versatile CubeSat Telescope: going to large apertures in small spacecraft," *Proc. SPIE. UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts X. 11819*, 2021. DOI: 10.1117/12.2594884.
- [5] E. Muslimov, et al. "A fast, wide-field and distortion-free telescope with curved detectors for surveys at ultra-low surface brightness", *Appl. Opt.*, 56(31). pp. 8639-8647, 2017. DOI: 10.1364/AO.56.008639.
- [6] Qingyu Meng, Hongyuan Wang, Kejun Wang, Yan Wang, Zhenhua Ji, and Dong Wang, "Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of view based on an integration mirror," *Appl. Opt.*, vol. 55, is. 32, pp. 8962-8970, 2016. DOI: 10.1364/AO.55.008962.
- [7] Tong Yang, Guo-Fan Jin and Jun Zhu, "Automated design of freeform imaging systems", *Light: Science & Applications*, vol. 6, is. 10, e17081, 2017. DOI: 10.1038/lsa.2017.81.
- [8] R. Guzmán, et al. "A compact multispectral imager for the MANTIS mission 12U CubeSat", *Proc. of SPIE*, vol. 11505, 1150507, 2020. DOI: 10.1117/12.2568080.
- [9] С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків, *Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування*: навч. посіб. Київ, Україна: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019.
- [10] С. С. Кохан, А. Б. Востоков, *Дистанційний моніторинг земельних ресурсів*. Навч. посібник. Київ, Україна: ЦП «КОМПРИНТ», 2018.
- [11] Б. В. Четверіков, І. В. Калинич, *Методика застосування даних дистанційного зондування землі в оцінці наслідків надзвичайних ситуацій*. Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2022.
- [12] V. Sokurenko і D. Bondarchuk, "Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива з виправленою дисторсією", *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, вип. 56(2), с. 18–24, Груд 2018. DOI: 10.20535/1970.56(2).2018.152205.
- [13] В. М. Сокурєнко, М. М. Вакуленко, "Автоматизований розрахунок окулярів з дифракційними оптичними елементами", *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*, №1 (257), с. 107–112, 2018.
- [14] 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.
- [15] 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 (315), с. 219-223, 2022. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-315-6-219-223.

UDC 681.782

¹⁾V. M. Sokurenko, ²⁾O. M. Sokurenko¹⁾National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine²⁾Optical and mechanical professional college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**ASPHERIC TWO-MIRROR TELESCOPES OF NANOSATELLITES FOR REMOTE EARTH SENSING AND SEARCH OF MINERALS**

The optical system is one of the important components of any space satellite used to observe the Earth's surface or astronomical objects. Due to the small overall size of nanosatellites, lens objectives with the relatively short focal length are often used. The latter provides the sufficiently wide field of view, but limits the spatial resolution of obtained images. In addition, to address various problems in agriculture and geodesy, it is important to obtain images of the earth's surface in different spectral ranges. This fact prevents the application of widespread commercial photographic lenses corrected for the visible spectral range. The article presents the results of the automated parametric synthesis of centered and decentered aspheric optical systems of mirror telescopes based on the Ritchie-Chretien scheme. The obtained optical systems have the focal length of 547 mm, the square entrance aperture of 80×80 mm, and the axial length that does not exceed the size of two CubeSat units. The angular field of view of the telescopes, which is equal to 0.7° in diagonal, enables to apply modern matrix image sensors having a diagonal of the sensitive area up to 6.7 mm. For an axial beam, 90% of the radiation energy falls into a square area of the image with a side of 2.5 μm. The maximum value of relative distortion does not exceed 0.4 %. The considered mirror systems do not have chromatic aberrations, which makes it possible to obtain high-quality images not only in the visible spectral range, but also in several infrared sub-bands. The given results of the aberration analysis testify to the high image quality achieved in both variants. The presented optical systems can observe a rectangular area of the Earth's surface with the diagonal size of about 7.9 km from the satellite's track height of 650 km. When using a multi-element image detectors with the pixel size of 3 μm, the geometric projection of one pixel on the Earth's surface will be equal to 3.6 m.

Keywords: nanosatellite; CubeSat; remote sensing of the Earth; reflector; Ritchie-Chretien telescope; distortion; aberrations.

*Надійшла до редакції
13 квітня 2023 року*

*Рецензовано
03 травня 2023 року*



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