

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ТЯГУР ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 681.7

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОГО І ЕНЕРГЕТИЧНОГО  
РОЗДІЛЕННЯ КОСМІЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ  
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

Спеціальність 05.11.07 – Оптичні прилади та системи

**АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

Київ - 2020

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України і в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» Державного космічного агентства України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор

**Колобродов Валентин Георгійович,**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент

**Яценко Ірина В'ячеславівна,**

Черкаський державний технологічний університет, професор кафедри електротехнічних систем

доктор технічних наук, доцент

**Стрілкова Тетяна Олександрівна,**

Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

доктор технічних наук, професор

**Маслов Володимир Петрович,**

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства

Захист дисертації відбудеться 20 жовтня 2020 р. о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр.-т. Перемоги, 37, корп. №1, ауд.201.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського за адресою: 03056, м. Київ, пр.-т. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «\_\_\_» вересня 2020 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Н. І. Буза

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день в світі спостерігається тенденція стрімкого прогресу в розвитку та використанні супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Число країн, які безпосередньо беруть участь в тому чи іншому проєкті перевищило 30, а 24 з них мають власні супутники ДЗЗ. Сучасні технічні засоби ДЗЗ дозволяють отримувати цифрові зображення поверхні Землі з високим просторовим розділенням та в широкому діапазоні спектра електромагнітних хвиль. Це дозволяє отримувати більш детальну інформацію про об'єкти спостереження. Основною тенденцією останніх років є створення нових легких космічних апаратів (КА) ДЗЗ з підвищеним просторовим розділенням. Для цього потрібно: створення нових високочутливих приймачів випромінювання з малими розмірами пікселів та великим динамічним діапазоном; розробка нових компактних довгофокусних об'єктивів, які забезпечують високу світлосилу та дифракційну якість зображення; удосконалення методів зйомки; проектування та виготовлення легких асферичних дзеркал.

Застосування фотоприймачів з малим розміром пікселів призводить до покращення просторового розділення, але, в той же час, спричиняє різке зменшення енергетичного розділення. Тому для систем ДЗЗ високого розділення фірмами виробниками фоточутливих пристроїв (e2v, Teledyne Dalsa, Fairchild Imaging та інші) розробляються та виготовляються спеціальні ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою накопичування (ЧЗН), які дозволяють підвищити енергетичне розділення систем ДЗЗ. Але застосування таких ПЗЗ-лінійок потребує новий підхід при проектуванні систем ДЗЗ, який би ураховував специфіку роботи таких фотоприймачів.

Співвідношення просторового розділення та масо-габаритних і цінових характеристик визначають конкурентну здатність системи ДЗЗ на світовому ринку. Ці характеристики суперечать один одному. Підвищення просторового розділення потребує збільшення фокусної відстані об'єктива та діаметра світлової апертури, а для зменшення маси та габаритів потрібно їх зменшувати. Існуючі типи об'єктивів для систем ДЗЗ та методи їх проектування не дозволяють вирішити цю проблемну ситуацію.

Досі нема єдиного підходу при проектуванні для оптимального узгодження просторового й енергетичного розділення з масо-габаритними характеристиками систем ДЗЗ. Невирішеними залишаються і ряд проблем пов'язаних з збереженням просторового розділення в жорстких умовах експлуатації на орбіті цих систем та удосконаленням методів зйомки для підвищення просторового й енергетичного розділення.

Сучасні системи ДЗЗ – це високоточні вимірювальні прилади, які для забезпечення високого просторового та енергетичного розділення потребують калібрування багатьох параметрів. Вдосконалення методів калібрування ще один шлях підвищення просторового та енергетичного розділення.

Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення просторового та енергетичного розділення космічних систем ДЗЗ, вирішують актуальну

проблему, яка має наукове та практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота є результатом науково-дослідних робіт, які виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів та в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» за участю автора як відповідального виконавця згідно з:

- тематикою державних науково-дослідних робіт: «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків оптичного сканера з просторовим розрізненням 2,5м» за договорами з ДКАУ: від 08.10.2015 р. №1-11/15 (0115U005428); від 06.12.2016 р. №1-24/16 (0116U008988); від 22.12.2017 р. №1-29/17 (0117U005419); «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків сканера дальнього інфрачервоного діапазону» за договорами з ДКАУ: від 01.10.2015 р. №1-10/15 (0115U005429) та від 06.12.2016 р. №1-23/16 (0116U008989);

- тематикою госпдоговірних робіт: «Технологія підвищення просторового розділення зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи «Січ» за допомогою субпіксельної обробки» за договором № 10 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 27.02.2013 р. № 133 (РК № 0113U000913); «Розробка методів розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» за договором № 453/4 від 29.05.2013 р.; «Фізична модель ІЧ спектрорадіометра з підвищенням просторового розділення за допомогою субпіксельної обробки зображень» за договором № 13 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 05.03.2014 №142 (РК № 0114U001665); НДР №2721п «Розробка методів і розрахункового інструментарію для об'єктивної оцінки просторового і енергетичного розділення космічних ІЧ камер ДЗЗ» (0114U003421).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення якості зображення в космічних оптико-електронних системах (ОЕС) дистанційного зондування Землі шляхом удосконалення методів проектування та контролю їх основних характеристик.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність створення ОЕС ДЗЗ з підвищеною роздільною здатністю на основі аналізу існуючих систем, їх характеристик та тенденцій їх розвитку.
2. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення.
3. Розробити і дослідити абераційні моделі нових оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення.
4. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування.
5. Дослідити переваги та недоліки оптичних систем гіперспектрометрів, які

використовують призми та дифракційні ґратки, а також зображувальних Фур'є-спектрометрів.

6. Розробити методи вимірювання основних характеристик космічних оптико-електронних систем ДЗЗ, а саме геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктів, деформація дзеркал об'єктива.
7. Дослідити тепловізійну камеру космічного базування з мікроболометричною матрицею, а саме: мінімальну роздільну різницю температур (MRPT) камери, MRPT з субпіксельним зміщенням і обробкою зображень, а також удосконалити методи дистанційного вимірювання температури земної поверхні інфрачервоним (ІЧ) спекторадіометром.
8. Провести експериментальні дослідження розроблених методів проектування об'єктів для систем ДЗЗ з заданими властивостями.

*Об'єктом дослідження* є процес формування зображення в космічних оптико-електронних системах ДЗЗ різного призначення, що працюють в видимому та інфрачервоному діапазонах випромінювання.

*Предметом дослідження* є методи підвищення просторового та енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем ДЗЗ.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач в роботі використовуються аналітичні, чисельні і експериментальні методи дослідження. Аналітичні методи базувалися на математичному моделюванні процесів перетворення інформації від об'єкта спостереження до приймача випромінювання ОЕС, а також теорії аберацій оптичних систем. Чисельні методи використовували комп'ютерні програми ZEMAX. Експериментальні методи використовувалися для перевірки достовірності розроблених методів проектування оптичних систем та методів контролю ОЕС ДЗЗ.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше отримано аналітичні залежності, що зв'язують конструктивні параметри об'єктів для отримання дифракційної якості зображення, які покладені в основу експрес-методу розрахунку двох типів об'єктів - трьохдзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим збільшеним полем зору та трьохдзеркального вісесиметричного об'єктиву.

2. Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температуру Земної поверхні.

3. Запропоновано новий підхід та отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єктиву для ІЧ області спектру, які поєднують вибір характеристик матеріалів, оптичних сил лінз та відстаней між ними для утримання площини фокусування об'єктиву в площині фотоприймача при різних температурах експлуатації ОЕС.

4. Уточнено математичну модель формування й перетворення інформації в тепловізійній камері при її космічному базуванні та отримано нове рівняння для

розрахунку мінімальної роздільної різниці температур (MRPT), яке враховує роботу тепловізійної камери без участі спостерігача.

5. Вперше запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів, який базується на порівнянні освітленостей в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його вхідного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно вхідного отвору об'єктива.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Визначено залежності діаметра світлової апертури об'єктива від необхідного просторового розділення, висоти орбіти КА і спектрального діапазону. Запропоновані критерії вибору оптимального значення апертури дозволяють зробити вибір параметрів об'єктива для отримання необхідної якості зображення при мінімальних габаритних та вагових характеристиках системи на початкових етапах проектування.

2. Запропонований метод розрахунку величини проекції пікселя та нахилу рядків та стовбців матриці фотоприймача на поверхні Землі дозволяє отримати характеристики просторової роздільної здатності та якості зображення при зйомці поверхні Землі при відхиленні від надиру, оцінити вплив характеристик платформи КА на якість зображення.

3. Отримані формули для розрахунку конструктивних параметрів об'єктів, що лягли в основу експрес-методу розрахунку, дозволяють швидко розрахувати два типи трьохдзеркальних об'єктів з п'ятьма виправленими аберациями для систем ДЗЗ високої та надвисокої роздільної здатності. На розроблену за цим методом оптичну схему об'єктива були отримано патент України на винахід №94303, МПК G02B 17/00 та акти впровадження.

4. Запропонований метод космічної зйомки та отримані формули для розрахунку роздільної здатності та узгодження параметрів об'єктива й мікроболометричної матриці дозволяють на етапі проектування оцінити та оптимально узгодити характеристики окремих елементів космічної ІЧ системи спостереження

5. Отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єктива для ІЧ області спектру дозволяють отримати об'єктив з новими експлуатаційними якостями.

6. Методи геометричного та радіометричного калібрування дозволяють провести атестацію ОЕС ДЗЗ для відповідності міжнародним стандартам знімків, що будуть отримані такими системами.

7. Новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів дозволить значно зменшити габарити та спростити й здешевити виготовлення вимірювального стенду, а також визначати не тільки коефіцієнт розсіювання, а і його складові розсіювання від оптичних і механічних елементів. На цей метод було отримано патент України на винахід №103242, МПК G01M 11/02, G02B 13/00.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є узагальненням результатів майже дванадцятирічних досліджень автора. Основні теоретичні,

розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Всі результати дисертації, які виносяться на захист, отримані автором особисто.

Дисертаційна робота виконана в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» та Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Науковий консультант д.т.н., професор Колобродов В.Г. Робота є результатом самостійних досліджень Тягура В.М.

Без співавторства опубліковано дві статті та шість тез доповідей [12,14,36, 56,71,72,79,83].

В опублікованих у співавторстві наукових працях внесок автора є наступним: зроблено аналіз мікроболометричних передавальних камер для дистанційного зондування Землі із космосу [1]; запропоновано і досліджено метод ахроматизації оптичних систем об'єктивів для тепловізорів [2]; запропоновано новий метод для вимірювання коефіцієнтів розсіювання [3]; запропонована і досліджена модель космічного тепловізора, яка не враховує дисплей і оператора [4]; розроблено структурну схему установки для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктивів [5]; досліджена модуляційна передавальна функція тепловізора з мікроболометричною матрицею [6]; запропонована класифікація зображуючих Фур'є-спектрометрів [7]; запропонована нова оптична система тридзеркального анастигматичного об'єктива з позаосьовим полем зору [8]; досліджено метод підвищення роздільної здатності спектрорадіометра при реєстрації субпіксельно зміщених зображень [9]; запропоновано математичну модель для розрахунку деформації поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал [10]; розроблена геометрична модель для дослідження енергетичного розділення оптико-електронної системи космічного сканера [11]; розроблено алгоритм розрахунку оптичних дзеркал при наявності деформацій [13]; досліджено процес зміни форми проекції пікселя сканера на поверхні Землі при зміні кута візування [15]; отримана формула для дослідження просторового розділення сканера, яка враховує кривизну поверхні Землі [16]; досліджена МПФ ОЕС при відхиленні осі візування від надира [17]; запропоновано метод геометричної калібровки кутових параметрів сканера ДЗЗ [18]; запропоновано і розглянуто оптимальний склад бортового оптико-електронного комплексу перспективного супутника ДЗЗ [19]; запропоновано метод розрахунку роздільної здатності при реєстрації субпіксельно зміщених зображень [20]; розроблена система рівнянь для розрахунку конструктивних параметрів атермалізованого ІЧ об'єктива ахромата [21]; запропонована оптична система космічного спектрорадіометра високого просторового розділення [22]; досліджено спосіб формування зображення за допомогою оптико-електронного сканера космічного базування [23]; запропоновано оптичну систему три дзеркального анастигматичного об'єктива для сканера високого розділення [24]; досліджено метод підвищення просторового розділення багато спектрального космічного сканера [25]; запропоновано ввести до спектрометра додаткове дзеркало [26]; розроблено алгоритм вимірювання коефіцієнта розсіювання [27]; досліджено термічні

аберації ІЧ об'єктива [28]; запропоновано метод формування субпіксельно зміщених зображень [29]; оптимізовано конструктивні параметри тридзеркального анастигматичного об'єктива [30]; запропоновано перераховувати зображення різних спектральних каналів на єдину фізичну величину [31]; проаналізовані досягнення і проблеми розвитку ОЕС ДЗЗ [32]; обґрунтовані можливість використання космічних гіперспектрометрів в різних сферах народного господарства [33]; розроблено програму для розрахунку оптичних елементів [34]; розроблено алгоритм розрахунку просторового розділення сканера системи ДЗЗ [35]; розроблені дві оптичні системи ІЧ об'єктивів тепловізорів [37]; досліджена фізико-математична модель багатоспектральної супутникової системи спостереження [38]; запропоновано оптичні системи спектрального сканера ДЗЗ [39]; розроблено метод і апаратуру для кутової калібровки ОЕП [40]; запропоновано алгоритм обробки субпіксельних зображень [41]; розроблено модель визначення розсіювання об'єктива [42]; запропонована схема для вимірювання розсіювання [43]; удосконалена схема для вимірювання розсіювання в об'єктиві [44]; запропонована модель космічного тепловізора на МБМ [45]; розроблена система рівнянь для проектування ІЧ об'єктива [46]; розроблена структура стенду для вимірювання МРРТ [47]; досліджено метод субпіксельної обробки ІЧ зображень [48]; обґрунтована можливість використання МБМ в ОЕС ДЗЗ [49]; запропоновано нові критерії оцінки ефективності ІЧ ОЕС [50]; запропоновано основні характеристики ІЧ камер ДЗЗ [51]; проведено розрахунок оптичної системи спектрометра [52]; обґрунтована доцільність використання субпіксельних кадрів [53]; досліджена модель нового ІЧ спектрорадіометра [54]; досліджена математична модель тепловізора з субпіксельною обробкою зображень [55]; запропоновано метод підвищення розділення ІЧ камери [57]; досліджено просторове розділення ІЧ камери ДЗЗ [58]; досліджена модель зображуючого фур'є-спектрометра [59]; розроблено методики проведення контролю тепловізорів [60]; запропоновано метод вимірювання коефіцієнта розсіювання [61]; запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива і МБМ [62]; досліджена модель зображувального спектрометра для ДЗЗ [63]; запропоновано метод вимірювання випромінювання Землі [64]; запропоновано метод контролю контролю форми дзеркал [65]; досліджена модель полегшення дзеркал космічного базування [66]; отримано МПФ МБМ з субпіксельною реєстрацією зображень [67]; проведено аналіз впливу деформацій дзеркала на його ФРТ [68]; розроблена модель деформації поверхні дзеркала [69]; запропоновано метод підвищення розділення спектрорадіометра [70]; розроблено метод вимірювання характеристик тепловізора [73]; обґрунтована доцільність використання мінімальної сприймаючої різниці температур [74]; отримано аналітичний вираз функції розсіювання точки [75]; запропоновано метод контролю асферичних дзеркал [76]; проведено комп'ютерне моделювання кріплення дзеркал [77]; отримана формула для дослідження просторового розділення сканера при зміні кута візування [78]; запропоновано схему довгофокусного дзеркального об'єктива



[80]; досліджено метод підвищення просторового розділення ІЧ камер, який ґрунтується на узгодженні параметрів об'єктива і МБМ [81]; запропоновано для оцінки ефективності використовувати просторове і енергетичне розділення [82].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження обговорювалися на 24 науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2010 - 2018 рр.); Перша Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників (м. Київ, 2008); VIII Міжнародна науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях” (п. Рибачьє, Крим, 2009 р.); 22<sup>nd</sup> General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22) (Puebla, Mexico, 2011), Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований» (г.Алматы, Казахстан, 2011 г.); IX and X International Conference on Digital Technologies (м. Жиліна, Словачія, 2013, 2014 рр.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013» (м. Київ, 2013 р.); 14-та Українська конференція з космічних досліджень (м. Ужгород, 2014 р.); 15-та та 16-та Українська конференція з космічних досліджень (м. Одеса, 2015-2016 р.р.); Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» (м. Київ, 2014 р.); China-Ukraine forum on Science and Technology (Harbin, China, 2016); II Українська конференція «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи» (м. Київ 2016 р.); 6-я Международная конференция «Космические технологии: Настоящее и будущее» (г. Днепр, 2017); III Українська конференція «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи» (м. Київ 2018 р.);

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 83 наукові праці, у тому числі 1 монографія, 21 стаття у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях іноземних держав, 17 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 9 патентів на винахід, 52 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури та 8 додатків. Повний об'єм дисертації 388 сторінок з об'ємом основного тексту  $\approx 250$  сторінок. Дисертація містить 100 рисунків, 22 таблиці, список використаної літератури з 267 найменувань на 34 сторінках і 8 додатків на 48 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведені дані про публікації й апробацію результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими темами.

У **першому розділі** обґрунтовано необхідність створення оптико-електронних систем (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з

підвищеною просторовою роздільною здатністю на основі аналізу існуючих систем, їх характеристик та тенденцій їх розвитку. Розглянуто призначення та основні характеристики ОЕС ДЗЗ.

До складу сучасних супутників ДЗЗ можуть входити наступні типи іконічної апаратури: багатоспектральні і гіперспектральні сканери, космічні тепловізори (КТ). Ефективність їх застосування для вирішення конкретної задачі визначається, перш за все, узагальненими характеристиками цих систем. На думку автора до таких найбільш важливих характеристик можна віднести: робочий спектральний діапазон, просторове, енергетичне і спектральне розділення або відповідні роздільні здатності, проекція пікселя на поверхні Землі GSD (ground sampling distance), ширина смуги захвату, кількість спектральних каналів. Необхідно також враховувати габарити, вагу і вартість системи. Однією із важливих тенденцій розвитку космічних КА ДЗЗ є зменшення їх габаритів і ваги без погіршення характеристик системи. Це значно скорочує строки і ціну створення та запуску таких малих апаратів.

У світі існує стійкий попит на багатоспектральні сканери високої роздільної здатності. В 2011 р. було запущено український супутник ДЗЗ «Січ-2», а раніше єгипетський супутник ДЗЗ «Egypotsat-1», які в своєму складі мали багатоспектральний сканер ОМБ МСУ з просторовим розділенням на поверхні Землі 7,8 м в чотирьох спектральних каналах та ОМБ ССІЧ з просторовим розділенням 40 м. Ці супутники були виготовлені підприємствами і організаціями України за участю автора.

Результати аналізу основних існуючих космічних ОЕС ДЗЗ, їх характеристик та тенденцій розвитку цих систем, дозволяють зробити висновок про зацікавленість космічних країн до дослідження, проектування, виготовлення і практичного використання багатоспектральних систем спостереження високого та надвисокого просторового розділення, інфрачервоних та гіперспектральних системи спостереження.

На відміну від багатоспектральних сканерів видимого діапазону кількість запущених і сканерів, що розробляються, ІЧ діапазону набагато менше, хоча в останні роки інтерес до зондування земної поверхні в цьому діапазоні різко зріс. Було проведено аналіз 18 КТ, який показав, що типовими характеристиками об'єктів сканера середнього і дальнього ІЧ діапазону є: фокусна відстань 46 мм; діаметр вхідної зіниці 23,2 мм; відносний отвір 1:2; поле зору  $2\omega=19^\circ$ ; величина проекції пікселя 370 м; смуга захвату 190 км.

Проведений аналіз сучасних ОЕС ДЗЗ та тенденцій їх розвитку свідчить про те, що головною проблемою при створенні таких систем є підвищення якості зображення, що досягається застосування ОЕС з високою просторовою роздільною здатністю, широким робочим спектральним діапазоном та високим спектральним розділенням.

В теперішній час гіперспектральні технології є актуальним сегментом розвитку ОЕС. Застосування гіперспектрометрів для завдань ДЗЗ забезпечує можливість одержання знімків високого як просторового, так і спектрального розділення. В гіперспектрометрі кінцеве зображення надається у вигляді набору

знімків однієї і тій самій ділянки поверхні Землі, сформованих різними вузькими спектральними каналами, кількість яких досягає від декількох сотень до тисяч. В якості диспергуючого елементу використовуються призми, дифракційні ґратки, інтерференційні фільтри і зображуючі Фур'є-спектрометри.

Розглянуті основні характеристики систем спостереження високого та надвисокого просторового розділення, інфрачервоних систем спостереження та гіперспектральних систем дозволили сформулювати мету та задачі дослідження представленої дисертації. Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення якості зображення в космічних ОЕС шляхом удосконалення методів проектування та контролю їх основних характеристик.

Поставлена в дисертації мета досягається вирішенням наступних задач:

*Для ОЕС спостереження високого та надвисокого просторового розділення:*

1. Удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення.
2. Розробити і дослідити абераційні моделі нових оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення.

*Для інфрачервоних систем спостереження:* удосконалити і дослідити узагальнену фізико-математичну модель інфрачервоної системи спостереження космічного базування, що дасть можливість створити систему з меншим просторовим розділенням.

*Для гіперспектральних систем:* дослідити переваги та недоліки оптичних систем гіперспектрометрів, які використовують призми та дифракційні ґратки, а також Фур'є-спектрометрів з метою покращення їх характеристик.

Для підтвердження результатів фізико-математичного моделювання необхідно: розробити методи вимірювання основних характеристик ОЕС ДЗЗ, а саме геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктів, деформація дзеркал об'єктива; дослідити КТ з мікроболометричною матрицею, а саме МРРТ з субпіксельним зміщенням зображень; провести експериментальні дослідження розроблених методів проектування об'єктів для систем ДЗЗ з метою підтвердження теоретичних положень.

У **другому розділі** розглянуто удосконалену модель ОЕС космічних сканерів високого і надвисокого просторового розділення. Дослідження моделі дозволило визначити такі оптимальні параметри об'єктива, як фокусна відстань, кутове і лінійне поле зору, діаметр входної зіниці і роздільну здатність.

У порівнянні зі сканерами середнього й низького просторового розділення робота сканера високого просторового розділення має ряд особливостей. По-перше, для одержання достатнього радіометричного розділення необхідно використовувати лінійку з TDI (Time Delay Integration), по-друге, для збільшення смуги огляду й для одержання стерео знімків КА може відхилятися від надиря на значні кути, що приведе до зміни проєкції пікселя, а значить і до зміни просторового розділення.

Залежно від необхідного геометричного просторового розділення  $GSD$ , висоти орбіти  $h_f$  і необхідної величини МПФ  $M_o$  об'єктив повинен мати певний

діаметр вхідної апертури, яка зазвичай збігається з головним дзеркалом. Отримано формулу для знаходження необхідного діаметра світлової апертури залежно від заданого просторового розділення, висоти орбіти супутника, робочого спектрального діапазону оптичної системи, необхідного значення МПФ об'єктива на частоті Найквіста та коефіцієнту екранування об'єктива. Крім того, на контраст впливає і величина центрального екранування  $K_{EKP}$  у дзеркально-лінзових і дзеркальних системах, величина якого становить порядку  $K_{EKP} \approx 0,35$ .

$$D_p = 0,5182 \left[ 1 + \left( 2,2044 - K_{EKP}^{1,4} \right) M_o(\nu_N) \right] \cdot \frac{h_f \cdot \lambda}{GSD} \quad (1)$$

у діапазоні необхідних значень контрасту МПФ об'єктива на частоті Найквіста  $0 \leq M_o(\nu_N) \leq 0,25$  і величині коефіцієнта центрального екранування оптичної системи  $0 \leq K_{EKP} \leq 0,5$ .

Другим обмеженням для підвищення просторового розділення є вага сканера, яка, в основному, визначається габаритами головного дзеркала, в другу чергу, довжиною його об'єктива, яка залежить від фокусної відстані. Встановлено, що для сканера із просторовим розділенням 1 м можна застосувати полегшене дзеркало діаметром 315 мм і вагою близько 2,3 кг. Для досягнення просторового розділення 0,7 м необхідне дзеркало діаметром 450 мм і вагою 7,2 кг, тобто в 3,13 рази важче, а для одержання просторового розділення 0,5 м необхідне дзеркало діаметром 630 мм і вагою 21,3 кг. Це означає, що при підвищенні просторового розділення в 2 рази з 1 м до 0,5 м вага головного дзеркала збільшується в 9,3 рази.

Третім чинником для оптимізації параметрів сканеру є величина лінійного розділення на місцевості (ЛРМ)  $LPM$ , при різних діаметрах світлової апертури. В якості критерію для порівняння якості зображення запропоновано обрати відношення середнього значення ЛРМ в заданому діапазоні різниць альbedo між об'єктом та фоном  $0,03 \leq \Delta\rho \leq 0,4$  до величини  $GSD$  ( $LPM_{CP} / GSD$ ). На рис. 1 наведена залежність ( $LPM_{CP} / GSD$ ) від ( $D_p \cdot GSD$ ), аналіз якого показує, що згідно до запропонованого критерію оптимальним діаметром вхідної апертури слід вважати  $320 \leq (D_p \cdot GSD) \leq 370$ .

Оптичні системи високої просторової роздільної здатності (ВПРЗ) мають невеликі кути поля зору, а отже і невелику смугу захвату на поверхні Землі в межах від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів. При зйомці тільки в надир періодичність спостереження таких систем буде дуже малою, отже КА з ОЕС ДЗЗ для підвищення періодичності спостереження мають змогу міняти кутову орієнтацію по осям тангажу, крену та рискання. Підвищення періодичності спостереження на різних витках польоту КА відбувається за рахунок нахилу по куту крену на першому витку, а на другому витку – за рахунок нахилу по куту тангажу. При повороті КА відносно надиру на кути тангажу  $\theta$  та крену  $\phi$  візирна вісь сканера також повернеться на ці кути.

Зміниться також і геометрія проєкцій пікселів та їх розташування в системі координат Землі, що необхідно врахувати при проектуванні ОЕС ДЗЗ.

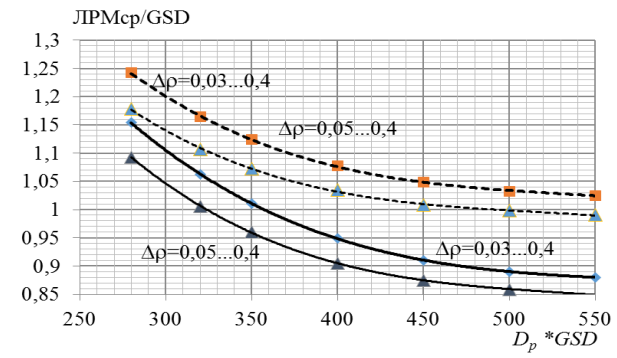


Рис. 1. Залежність лінійного розділення на місцевості  $LPM_{cp}$  від діаметра дзеркала  $D_p$

Зазвичай якість зображення ОЕС визначається модуляційною передавальною функцією (МПФ). Сумарна МПФ системи «атмосфера – сканер»  $M_{\Sigma}$  дорівнює добутку МПФ окремих складових, які впливають на якість зображення (атмосфери  $M_{ATM}$ , об'єктива  $M_o$ , фотоприймача  $M_D$ , фазового положення тест-об'єкта  $M_{\phi}$ , зміщення зображення об'єкту під час зйомки відносно пікселя за рахунок руху КА по орбіті  $M_{zc}$ , нестабільності положення осі КА  $M_{\omega}$  та вібрації  $M_B$ , зміщення зображення об'єкту під час зйомки в режимі TDI відносно стовпця пікселів за рахунок обертання Землі  $M_{TDI}$ , та зміни кута візування  $M_{\theta,\phi}$ ).

Удосконалено фізико-математичну модель ОЕС космічних сканерів ВПРЗ, дослідження якої дозволили отримати аналітичні МПФ окремих складових, що обумовлені умовами експлуатації сканера. Сумарна МПФ сканера дорівнює:

- в напрямку польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_x) = M_o(v_x) M_{ATM}(v_x) M_D(v_x) M_{\phi}(v_x, \Delta x) M_{zc}(v_x, \Delta x') M_{\omega}(v_x) \cdot M_B(v_x) M_{\theta,\phi}(v_x); \quad (2)$$

- в напрямку перпендикулярному польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_y) = M_o(v_y) M_{ATM}(v_y) M_D(v_y) M_{\phi}(v_y, \Delta y) M_{\omega}(v_y) \cdot M_B(v_y) M_{\theta,\phi}(v_y) M_{TDI}(v_y). \quad (3)$$

При відхиленні візирної осі від надиру відбувається збільшення розміру проєкцій пікселів на поверхню Землі та поступове зміщення зображення об'єкта з центру пікселів стовпчиків. Для сканера ВПРЗ при відхиленні по кутах тангажу та крену  $\theta = 5^\circ$ ,  $\phi = 5^\circ$  зменшення МПФ на частоті Найквіста складає 2%. Дослідження отриманої МПФ показали, що допустиме відхилення візирної осі від надиру без зміни частоти рядків складає до  $\theta = 5^\circ$ ,  $\phi = 5^\circ$ .

Обґрунтовано вимоги до КА та ОЕС сканера ВПРЗ, а саме: відхилення візирної осі за час експозиції за рахунок нестабільності осі КА повинно

Отримано формули, які дозволяють розраховувати кутове відхилення стовпчиків і рядків проєкції пікселів ПВ на поверхні Землі. Аналіз цих формул показав, що при застосуванні в сканері ПЗЗ-лінійок з TDI накопиченням заряду послідовність розворотів КА «крен-тангаж» більше підходить для застосування в системах ДЗЗ ВПРЗ.

складати менше 0,5 миттєвого кутового поля зору; допустима амплітуда кутових коливань візирної осі при височастотній вібрації повинна складати не більше 0,25 миттєвого кутового поля зору; допустиме відхилення візирної осі від надиру без складає  $\theta = 2^\circ$ ,  $\phi = 2^\circ$  з просторовим розділенням менше 1 м.

Розроблено метод визначення радіометричного розділення, під яким розуміють мінімальну різницю  $\Delta\rho_n$  між коефіцієнтами відбиття об'єкта  $\rho_t$  і фону  $\rho_b$ , яка може бути виявлена ОЕС сканера з заданою ймовірністю, що визначається відношенням сигнал/шум  $SNR_d$ . Для інтегральних параметрах

сканера було отримано нову формулу для розрахунку радіометричного розділення в надирі

$$\Delta\rho_n = \rho_t - \rho_b = \frac{4H_n SNR_d}{\tau_A \tau_o E_0 t_i} \left( \frac{f'_o}{D_p} \right)^2, \quad (4)$$

де  $H_n$  – порогова експозиція МПВ;  $t_i$  – час інтегрування;  $\tau_A$  – коефіцієнт пропускання атмосфери;  $E_0$  – освітленість земної поверхні.

При відхиленні візирної осі сканера від надиру на кут  $\theta_{vx}$  збільшується проекція пікселя, що

призводить до погіршення просторового розділення (рис. 2). Було досліджено як змінюється площа цієї проекції в залежності від кута  $\theta_{vx}$ , в результаті якого отримано нову формулу

$$A_t = \frac{h_f V_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}} \frac{W_D h_f}{f'_o \cos \theta_{vx}} = \left( \frac{h_f}{f'_o} \right)^2 \frac{A_D}{\cos^3 \theta_{vx}}. \quad (5)$$

Аналіз цієї формули свідчить про те, що із збільшенням кута візування  $\theta_{vx}$  площа проекції пікселя теж збільшується, тобто погіршується просторове розділення сканера.

**Третій розділ** присвячено розробці і дослідженню оптичних систем сканерів ДЗЗ високого та надвисокого просторового розділення, які повинні мати значні фокусні відстані. Тому такі об'єктиви використовують дзеркальні системи, що можуть працювати в широкому спектральному діапазоні і мати невеликі габарити і вагу. Для систем ДЗЗ зазвичай використовують декілька типів об'єктивів: об'єктив Річі-Кретьєна, позаосьовий тридзеркальний анастигматичний об'єктив і тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша. Запропоновано абераційні моделі нових оптичних систем об'єктивів сканерів ВПРЗ, що дало можливість дослідити такі оптичні системи.

Розроблено метод проектування тридзеркального квазіортоскопічного об'єктиву з позаосьовим полем зору. У якості вихідних даних задавалися: фокусна відстань об'єктива  $f'_o$ , нормована середня відстань між головним й

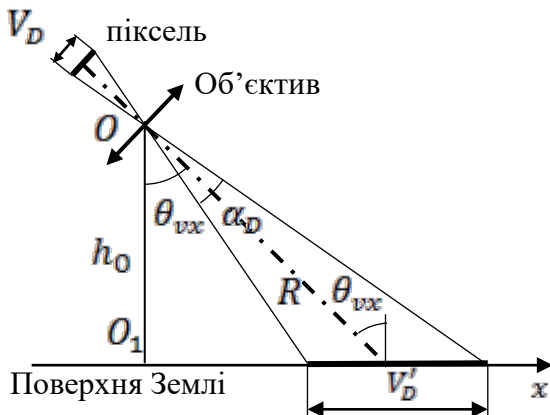


Рис. 2. Схема визначення просторового розділення при відхиленні візирної осі сканера від надиру

вторинним дзеркалом і вторинним й третинним дзеркалами  $d_{cp}=(|d_1|+d_2)/2f'_0$ , відношення відстаней між головним і вторинним дзеркалами та вторинним і третинним дзеркалами  $b=d_2/|d_1|$ , величина заднього фокального відрізка  $S'$  і відношення висоти першого параксiального променя на вторинному дзеркалі до висоти на головному дзеркалі  $g=h_2/h_1$ . Положення апертурної діафрагми було обрано на другому дзеркалі (рис. 3).

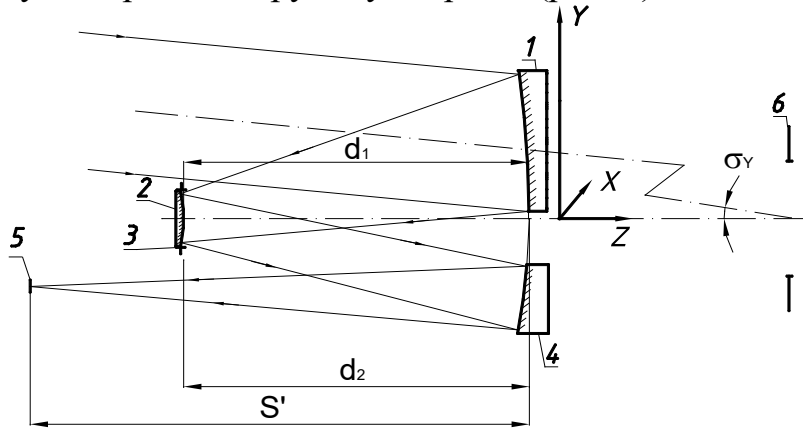


Рис. 3. Оптична схема тридзеркального об'єктива без екранування:

- 1 – головне дзеркало;
- 2 – вторинне дзеркало;
- 3 – апертурна діафрагма;
- 4 – третинне дзеркало;
- 5 – фокальна площина;
- 6 – вхідна зіниця

В результаті дослідження такого об'єктива отримано нові формули залежності конструктивних параметрів об'єктива від відстаней між дзеркалами для виправлення в об'єктиві п'ятих аберацій третього порядку. Встановлено, що для діапазону середньої відстані між дзеркалами  $0,42 < d_{cp} < 0,43$  третє дзеркало стає сферичним, що значно полегшує виготовлення і контроль такого об'єктива. Друге дзеркало може бути сферичним при середній відстані між дзеркалами  $0,56 < d_{cp} < 0,60$ .

Виготовлення позаосьових асферичних дзеркал, їх контроль і юстування тридзеркального об'єктива із позаосьовим полем зору являє собою складне технологічне завдання. Тому, з погляду спрощення конструкції, виникає цікава задача встановлення залежності кінчної постійної  $k$  дзеркал від обраних габаритів об'єктива. Для третього дзеркала при середній відстані між дзеркалами  $d_{cp} < 0,29$  воно повинне бути гіперболічним, при  $0,29 < d_{cp} < 0,42$  - еліптичним, а при  $d_{cp} > 0,43$  воно здобуває форму сплюсненого сфероїда. Для діапазону  $0,42 < d_{cp} < 0,43$  третє дзеркало стає сферичним, що значно полегшує виготовлення і контроль такого об'єктива.

Головне дзеркало при будь-яких габаритах об'єктива повинне мати гіперболічну форму. Конічна стала головного дзеркала змінюється залежно від середньої відстані між дзеркалами за формулою

$$k_1 \approx -76,9d_{cp}^4 + 179,9d_{cp}^3 - 159,3d_{cp}^2 + 64,3d_{cp} - 11,7. \quad (6)$$

В цьому розділі наведені результати дослідження удосконаленого об'єктива Корша з метою встановлення залежності конструктивних параметрів об'єктива, які забезпечать отримання вісесиметричної схеми тридзеркального об'єктива з усіма виправленими аберациями, у тому числі і дисторсією.

Аналіз конструктивних параметрів, при яких в об'єктиві виправлені усі аберації третього порядку, тобто всі п'ять сум Зейделя дорівнюють нулю



показав, що радіус головного дзеркала в залежності від відстанями між дзеркалами  $d_1$  і  $d_2$  змінюється відповідно до формули

$$R_l = (0,96...1,04) \left( 0,24|d_{2H}| + 0,355 \sqrt{\frac{d_{1H}}{0,068}} - 0,215 \right) f'_{ob}. \quad (7)$$

Розрахована по запропонованому методу оптична схема тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива наведена на рис. 4. Оптична довжина такого об'єктива може становити  $0,1f'_o$ , що дозволяє створювати малогабаритні довгофокусні об'єктиви для систем ДЗЗ з ВПРЗ.

Основним протиріччям при побудові сканера з панхроматичним і спектральними каналами є те, що для одержання достатнього енергетичного (радіометричного) розділення в більш вузьких спектральних каналах потрібно збільшувати величину проекції пікселя. Для вирішення цієї проблеми необхідно створення в одному сканері на базі одного основного об'єктива різних фокусних відстаней і відносних отворів для панхроматичного і спектральних каналів. Була проведена оптимізація оптичної системи сканера, в результаті якої запропонована нова система з додатковим проекційним об'єктивом, що дозволяє використовувати один тип ПЗЗ-лінійки для панхроматичного та спектральних каналів. В якості основного об'єктива було обрано тридзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив з фокусною відстанню  $f'_o$ . В фокальній площині цього об'єктиву розміщено ПЗЗ-лінійки спектральних каналів (рис. 5).

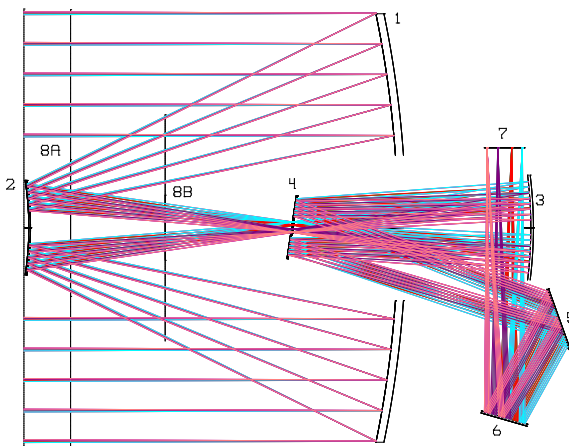


Рис. 4. Оптична схема тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктива

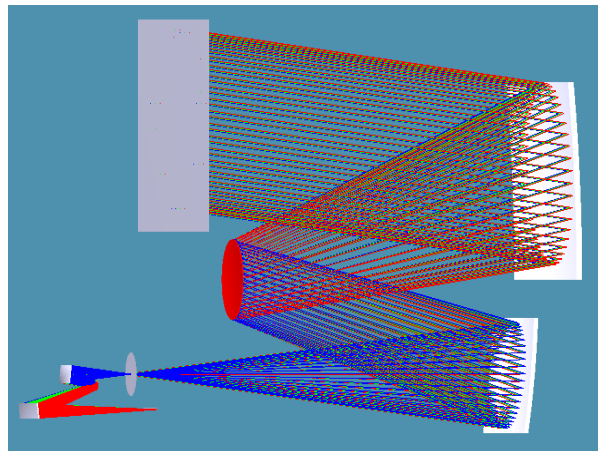


Рис. 5. Оптична схема об'єктива високої роздільної здатності з проекційним об'єктивом

**Четвертий розділ** присвячено удосконаленню і дослідженню фізико-математичної моделі космічного тепловізора з метою підвищення його просторової та енергетичної роздільної здатності. З цією метою була розглянута узагальнена модель системи «об'єкт – атмосфера – об'єктив – МБМ – електронний блок обробки відеосигналів».

Модуляційна передавальна функція (МПФ)  $M_s(\nu_x)$  КТ залежить як від МПФ об'єктиву  $M_o(\nu_x)$ , так і від МПФ МБМ  $M_{Dx}(\nu_x)$ , тобто



$$M_S(v_x) = M_O(v_x)M_{Dx}(v_x). \quad (8)$$

Сучасні ІЧ об'єктиви мають аберації, які обмежені дифракцією випромінювання на апертурі об'єктива. В такому випадку МПФ об'єктива визначається функцією

$$M_O(v_x) = \begin{cases} 1 - \frac{X'}{\eta_{di}}, & \text{при } 0 \leq X' \leq \eta_{di}; \\ 0, & \text{при } X' > \eta_{di}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $X' = 1,218\lambda k_{eff}v_x$ , а параметр  $\eta_{di}$  визначає відносне відхилення МПФ об'єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ.

Просторова МПФ МБМ визначається функцією, яка для одновимірного випадку має вигляд

$$M_{Dx}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (10)$$

Таким чином, МПФ тепловізора залежить від радіуса кружка розсіювання  $r_o$  об'єктива (або кружка Ейрі  $r_E$ ) та періоду пікселів  $V_D$  в МБМ. Для досягнення високої просторової роздільної здатності КТ необхідно узгодити між собою параметри  $r_o$  та  $V_D$ . Для цього було використано два критерія: рівність МПФ об'єктива и МБМ на частоті Найквіста  $v_N = 1/2V_D$  і рівність МПФ об'єктива и МБМ на заданій просторовій частоті  $v_{x2}$ . Результати досліджень при  $V_D = 25$  мкм наведені на рис. 6 і 7.

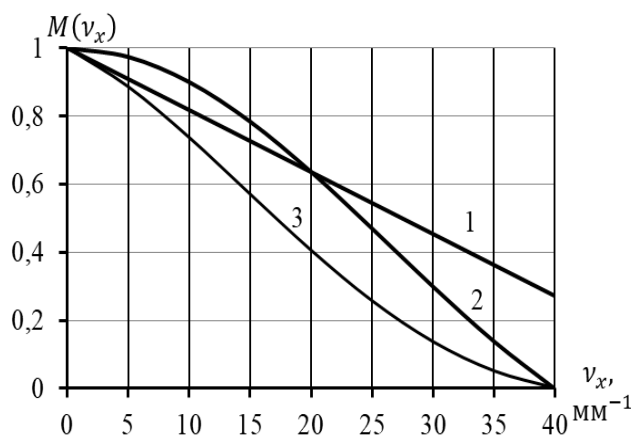


Рис. 6. Узгодження параметрів об'єктива  $r_o$  та МБМ  $V_D$  за першим критерієм:  
1 – МПФ об'єктива  $M_O(v_x)$  при  $\eta_{di}=0,672$ ;  
2 – просторова МПФ МБМ  $M_{Ds}(v_x)$ ;  
3 – МПФ тепловізора  $M_S(v_x)$

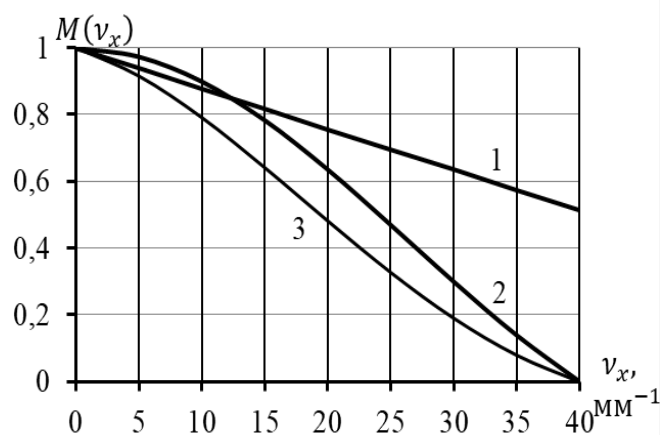


Рис. 7. Узгодження параметрів об'єктива  $r_o$  та МБМ  $V_D$  за другим критерієм:  
1 – МПФ об'єктива  $M_O(v_x)$  при  $\eta_{di}=1$ ;  
2 – просторова МПФ МБМ  $M_{Ds}(v_x)$ ;  
3 – МПФ тепловізора  $M_S(v_x)$

При узгодженні за першим критерієм контраст зображення на частоті Найквіста зменшується до 0,406. Для дифракційно обмеженого об'єктива підсумкова МПФ на частоті Найквіста при узгодженні за другим критерієм дорівнює 0,482, що свідчить про підвищення контрасту на 7,6% відносно зображення, отриманого при узгодженні за першим критерієм. За таких умов узгодження відбувається на частоті  $v_{x2} = 13$  мм<sup>-1</sup> при контрасті  $M_2 = 0,88$ .

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що узгодження дифракційно обмеженого об'єктива на довжині хвилі  $\lambda=10$  мкм з матрицею, яка має період пікселів  $V_D=17$  мкм відбувається на просторовій частоті  $\nu_x=28$  мм<sup>-1</sup>, що близька до частоти Найквіста ( $\nu_N=29$  мм<sup>-1</sup>). При цьому МПФ тепловізора на частоті Найквіста, як і в випадку з матрицею з періодом пікселів  $V_D=25$  мкм, складає  $M_S(\nu_N)\approx 0,4$ , але для просторової частоти  $\nu_x=20$  мм<sup>-1</sup>, яка для матриці з періодом пікселів  $V_D=25$  мкм відповідає частоті Найквіста. Підсумкова МПФ тепловізора з МБМ з  $V_D=17$  мкм буде  $M_S(\nu_N)\approx 0,62$ . Таким чином, контраст зображення об'єктів з просторовою частотою  $\nu_x=20$  мм<sup>-1</sup> в тепловізорі при використанні матриці з  $V_D=17$  мкм буде в 1,53 рази більше, ніж при використанні МБМ з  $V_D=25$  мкм.

Основними характеристиками КТ є просторове і енергетичне (температурне) розділення, які об'єднуються функцією під назвою мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ). Є ряд стандартів і методів, що визначають МРРТ, в яких тепловізійні зображення аналізуються спостерігачем на екрані дисплея. Однак такий підхід неможливо застосувати до тепловізорів, що розташовані на КА, де спостерігач і дисплей відсутні. Саме тому потрібно удосконалити і дослідити узагальнену модель КТ, в якій вплив дисплея і спостерігача на величину МРРТ вилючається.

На основі розглянутої вище моделі було отримано нову формулу для МРРТ тепловізійної камери космічного базування:

$$MRTD(\nu_x) = \frac{\pi}{4} SNR_r \frac{NETD}{M_S(\nu_x) \cdot \tau_A \cdot \tau_o}, \quad (11)$$

де  $SNR_r$  – відношення сигнал/шум на виході електронного блоку, яке дозволяє виявити штрихи міри Фуко з заданою ймовірністю.

Важливість функції  $MRTD(\nu_x)$ , як узагальненої характеристики КТ, полягає у тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для об'єктів великих розмірів) і просторове розділення на високих частотах. Функція  $MRTD(\nu_x)$  дозволяє ефективно порівнювати КТ, тому що враховує всю систему в цілому і її шуми. Оскільки МРРТ - це функція просторової частоти  $\nu_x$  і параметрів КТ, а також  $NETD$ , то, використовуючи залежність  $MRTD(\nu_x)$ , можна знайти просторову роздільну здатність системи.

Для КТ на МБМ при зміщенні зображення під час експозиції на величину  $\Delta X_{\omega_x}$  відбувається «змаз» зображення, МПФ якого описується функцією

$$M_{ЗС.МБМ}(\nu_x) = \frac{\sin(\pi \nu_x \Delta X_{\omega_x})}{\pi \nu_x \Delta X_{\omega_x}}. \quad (12)$$

Отримано формулу для розрахунку МПФ, що враховує зсув зображення, графік якої наведено на рис. 8 при часі експозиції 33 мс. Із графіків видно, що збільшення теплової сталої часу погіршує МПФ «зсуву» при застосуванні МБМ, а підвищення частоти кадрів, тобто зменшення часу експозиції по

відношенню до часу зміщення зображення на один піксель навпаки покращує МПФ «зсуву».

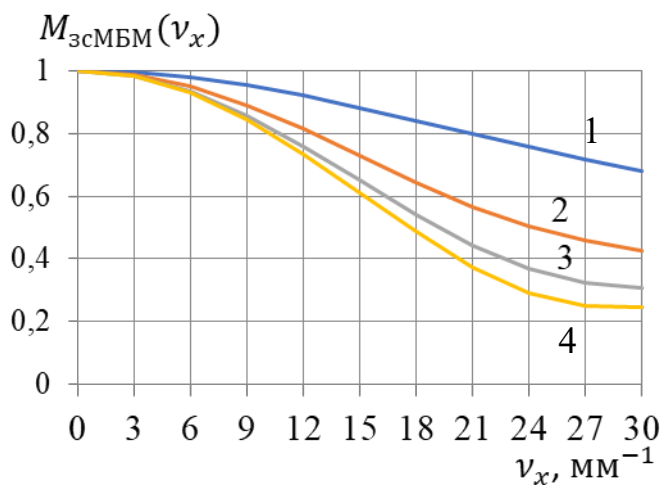


Рис. 8. МПФ «зсуву» МБМ для  $\tau_{th}$ : 1 – 5 мс; 2 – 10 мс; 3 – 15 мс; 4 – 20 мс.

Особливістю роботи МБМ є досить велике значення теплової сталої часу  $\tau_{th}$  по відношенню до часу експозиції в порівнянні з фотонними фотоприймачами, тому очікується значний вплив параметра  $\tau_{th}$  на МПФ.

Забезпечення високого просторового розділення отримуваних зображень при постійному значенні поля зору потребує збільшення кількості пікселів матричного приймача. Але це призводить до суттєвого ускладнення конструкції знімальної апаратури і підвищення її вартості. Для розв'язання даної проблеми використовують режим субпіксельної реєстрації зображень – *мікросканування* і подальшу *субпіксельну обробку* отриманих кадрів з метою відновлення зображення високого розділення. *Мікросканування* полягає в багаторазовому послідовному отриманні декількох зображень тієї ж самої сцени, зміщених одне відносно одного на певну долю геометричного розміру пікселя. Механізмом підвищення просторового розділення є субпіксельна реєстрація зображень при ДЗЗ, який ефективно здійснюється шляхом повороту КТ відносно напрямку польоту КА. Запропоновано метод космічної зйомки для отримання субпіксельно зміщених зображень з метою підвищення роздільної здатності та отримано формули для її розрахунку.

Просторова МПФ МПВ залежить від розміру пікселя та обмежується частотою Найквіста. При формуванні субпіксельної сітки розмір елемента розділення зменшується на певну величину, яка визначається як  $V_{DSR} = V_D / k_{SR}$ ,  $W_{DSR} = W_D / k_{SR}$ , де  $k_{SR}$  – коефіцієнт підвищення роздільної здатності при субпіксельній реєстрації.

З урахуванням розміру еквівалентного субпікселя просторова МПФ приймача випромінювання буде:

$$M_{DSR}(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_x V_{DSR})}{\pi v_x V_{DSR}} \frac{\sin(\pi v_y W_{DSR})}{\pi v_y W_{DSR}}. \quad (13)$$

Роздільна здатність КТ визначається МРРТ, до формулу якої входить МПФ всієї системи

$$MRTD(v_x) = SNR_r \frac{\pi NETD}{4 M_{SSR}(v_x) \tau_o \tau_A}. \quad (14)$$

На рис. 9 представлені графіки функції  $MRTD$ , які розраховані за формулою (14) для різних коефіцієнтів підвищення роздільної здатності  $k_{SR}$  при субпіксельній реєстрації. З графіків видно, що застосування коефіцієнту підвищення роздільної здатності 2, тобто реєстрація двох субпіксельно зміщених знімків, значно підвищує  $MRTD$ , особливо на високих просторових частотах. Подальше збільшення коефіцієнту підвищення роздільної здатності не призводить до значного покращення  $MRTD$  в наслідок того, що МПФ об'єктиву наближається до своєї дифракційної межі.

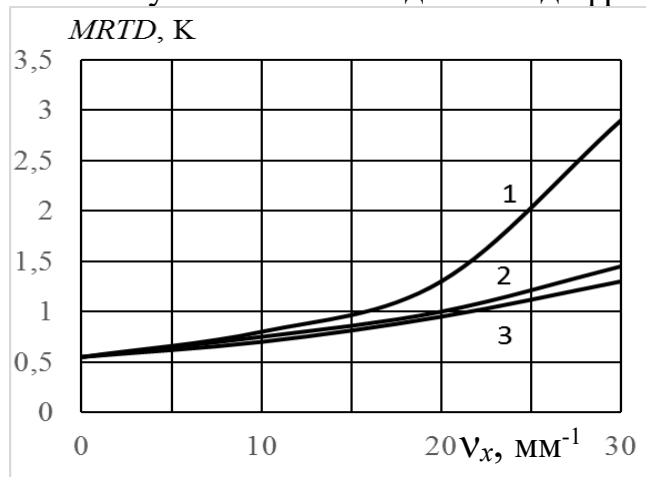


Рис. 9. Залежність MRPT КТ від коефіцієнта підвищення роздільної здатності: 1 –  $k_{SR}=1$ ; 2 –  $k_{SR}=2$ ; 3 –  $k_{SR}=3$

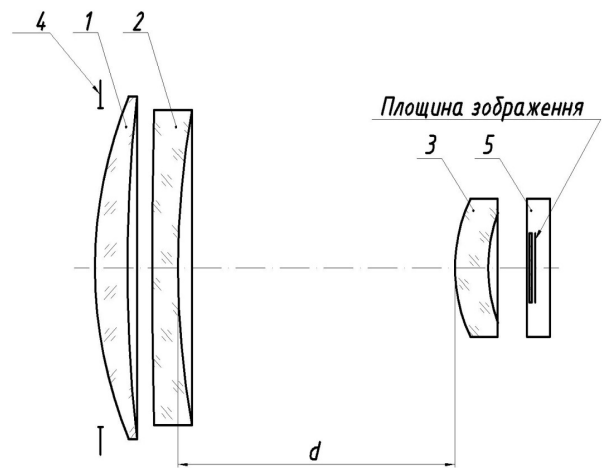


Рис. 10. Оптична схема атермального ІЧ об'єктива

Космічний тепловізор експлуатуються в складних умовах довкілля. Зміна температури викликає зміну конструктивних параметрів оптичних елементів, зміну лінійних розмірів механічних деталей несучої конструкції, зміну оптичних характеристик лінз. Це у свою чергу призводить до терморозфокусування, появи додаткових термоаберацій і, як наслідок, погіршення якості зображення. Запропоновано математичний апарат, що дозволяє проектувати атермалізовані ахроматичні ІЧ трикомпонентні оптичні системи з можливістю одночасної мінімізації аберацій зображення. За цим методом було розраховано об'єктив, що складається з трьох марок скла: ІКС-25, селенід цинку і германію (рис. 10). Об'єктив має фокусну відстань 112 мм, відносний отвір 1:1 і може працювати без терморозфокусування в діапазоні температур від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температуру Земної поверхні.

В п'ятому розділі наведені результати дослідження оптичних систем гіперспектрометрів, які використовують призми та дифракційні ґратки, а також зображувальних Фур'є-спектрометрів. Головною особливістю спектрометрії, що формує зображення, є можливість отримати зображення в більш ніж 100

спектральних каналах. Недоліками гіперспектральної зйомки є висока її вартість, складність й інформаційна надлишковість.

В результаті проведених досліджень сформульовані попередні технічні вимоги до перспективного гіперспектрометра, як складового елемента бортового комплексу одного з майбутніх українських супутників ДЗЗ: робочий спектральний діапазон 0,4-2,5 мкм; спектральне розділення 6-30 нм; кількість спектральних каналів 150; просторове розділення на місцевості 45 м; ширина смуги огляду 46 км.

Досліджено оптичні схеми гіперспектрометрів. Усі існуючі гіперспектрометри можна розділити за принципом дії на три групи: гіперспектрометри з диспергуючим елементом у вигляді призми або дифракційної ґратки, гіперспектрометри зі змінним інтерференційним фільтром, Фур'є-спектрометри. Досліджена оптична система гіперспектрометра на дифракційній ґратці. Найбільш часто в сучасних спектрометрах для побудови проєкційного об'єктива з дифракційною ґраткою використовують схему Оффнера з застосуванням двох дзеркал з трикратним відбиванням або з застосуванням трьох дзеркал. Така схема дозволяє виправити аберації 3-го порядку при роботі з великою апертурою. При цьому дифракційна ґратка наноситься на вторинне опукле сферичне дзеркало.

Запропонована оптична система гіперспектрометра має такі характеристики: просторове розділення 46,5 м; смуга огляду 47,6 км; Робочий спектральний діапазон  $\Delta\lambda = 0,45 \div 0,9$  мкм; кількість спектральних каналів – 115; спектральне розділення  $\delta\lambda \approx 3,9$  нм

До переваг гіперспектрометра з дифракційною ґраткою можна віднести дуже малі дисторсійні спотворення по усьому полі зору, високе спектральне розділення рівномірне по робочому спектральному діапазону та великий відносний отвір об'єктива 1:3,14, що забезпечує достатній рівень відношення сигнал/шум.

Запропонована оптична система гіперспектрометра на призмі, в якій вхідний об'єктив побудовано по схемі трьохдзеркального об'єктива з позаосьовим полем зору, в якому головне дзеркало гіперболічне, а інші дзеркала мають сферичну форму поверхні. До переваг гіперспектрометра з призмою можна віднести простоту конструкції (тільки одне асферичне дзеркало), суміщення в одному приладі двох спектральних діапазонів, висока якість зображення.

Просторово-спектральний розподіл світлової енергії на поверхні, за якою ведеться спостереження, можна отримати при використанні зображувального Фур'є-спектрометра (ЗФС), який має високе спектральне розділення. В залежності від способу отримання різниці ходу між променями ЗФС діляться на статичні і динамічні Фур'є-спектрометри. Розроблена модель формування зображення в ЗФС, яка дозволила визначити фокусну відстань вхідного об'єктива, поле зору приладу, просторове розділення та смугу захвату.

Встановлено, що просторове розділення ЗФС в меридіональному перетині визначається шириною вхідної щілини Фур'є-спектрометра та фокусною

відстанню вхідного об'єктива ЗФС, а в сагітальному розтині – розміром пікселя ПЗЗ-матриці та еквівалентною фокусною відстанню вхідного об'єктива й вихідного об'єктива Фур'є-спектрометра.

**Шостий** розділ присвячено розробці методів вимірювання та дослідження основних характеристик ОЕС ДЗЗ. Розроблено нові методи геометричного і радіаційного калібрування ОЕС ДЗЗ, які необхідно виконувати перед запуском КА. Геометричне калібрування сканера полягає у визначенні зв'язку візорних осей пікселів ПЗЗ-лінійок відносно контрольного елемента сканера. Для реалізації даного методу був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс і алгоритм розрахунку кутового положення оптичної осі об'єктива відносно пікселів ПЗЗ-лінійки.

Метою радіометричного калібрування апаратури ДЗЗ є забезпечення єдиних підходів при вимірюванні та експлуатації систем ДЗЗ для отримання достовірних чисельних даних про об'єкти зондування. Обов'язковими ознаками достовірності вимірних даних є отримання даних в світових еталонах фізичних величин, які виражені в одиницях міжнародної системи СІ. До основних радіометричних характеристик ОЕС ДЗЗ, які потребують обов'язкового передпольотного калібрування, слід віднести: спектральні характеристики чутливості; характеристики функції передачі сигналу та їх лінійність; рівномірність чутливості по полю зору; радіометричне розділення; радіометрична точність; стабільність радіометричних характеристик.

Найважливішим етапом радіометричного калібрування є передача одиниці радіометричної величини від еталона до робочих випромінювачів системи радіометричного калібрування і приймачів ОЕС, тобто на цьому етапі відбувається абсолютизація вимірювань характеристик і параметрів ОЕС і їх прив'язка до національних та міжнародних еталонів.

Через те, що реально вимірювана фізична величина є яскравість, то і градування їх енергетичних шкал необхідно здійснювати в одиницях енергетичної яскравості або в одиницях спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ). Радіометричне калібрування полягає в знаходженні в кожному спектральному каналі залежності між цифровими відліками  $DN_i$  на виході приладу ДЗЗ та значень СЩЕЯ  $L_i$  на вхідній апертурі сенсора. Така лінійна градувальна характеристика між  $DN_i$  та  $L_i$ , яка враховує калібрувальні коефіцієнти підсилення  $G$  та зміщення  $B$ , дасть змогу порівнювати результати космічної зйомки від різних ОЕС ДЗЗ в одних одиницях

$$L_i = G_i DN_i + B_i. \quad (15)$$

Можливі два методи радіометричного калібрування: згідно діючого ГОСТ 8.195-89 і метод, що базується на використанні абсолютного радіометру у вигляді інтегруючої сфери. Інтегруючі сфери забезпечують кращі метрологічні характеристики, хоча і мають більші габарити. Важливою перевагою інтегруючої сфери є можливість використання для підсвічування її внутрішньої поверхні декількох малопотужних джерел випромінювання, причому їх взаємне положення й кількість може змінюватися для плавної зміни енергетичної яскравості вихідного отвору інтегруючої сфери без зміни

спектрального складу випромінювання. Дослідження показали, що співвідношення діаметра вихідного отвору інтегруючої сфери до її внутрішнього діаметра, яке перебуває в інтервалі  $0,2 \dots 0,4$  будемо вважати прийнятним для одержання високих метрологічних характеристик інтегруючої сфери. Для сканерів ВПРЗ, в яких діаметр вхідної апертури досягає 700 мм, потрібен вихідний отвір інтегруючої сфери 800 мм, а діаметр інтегруючої сфери не менш ніж 2 м. Сумарна потужність ламп інтегруючої сфери, може досягати 6000 Вт.

Встановлено, що для вимірювання градуювальної характеристики як функції ефективної енергетичної яскравості у відносних одиницях  $\bar{L}$  потрібно здійснювати за допомогою інтегрального випромінювача, що забезпечує змінний з певним кроком потік випромінювання на вході системи ДЗЗ. По зареєстрованим вихідним сигналам  $U_i$  кожного спектрального каналу в межах заданого динамічного діапазону вхідних сигналів будуються градуювальні характеристики  $U_i(\bar{L})$  кожного спектрального каналу системи ДЗЗ, що калібруються. Для формування вхідних потоків можуть застосовуватися різні методи: використання закону обернених квадратів, фільтровий метод, метод додавання світла та інші. Існуючий стенд «Камелія» використовує перший метод, а його похибка калібрування складає 6,5%.

Для спрощення процедури калібрування, зменшення габаритів та ціни установки в КП СПБ «Арсенал» було створено універсальну установку для калібрування ОЕС ДЗЗ по другому методу, що базується на використанні абсолютного радіометру та дозволить проводити вимірювання світлотехнічних і енергетичних характеристик сканерів, вимірювання коефіцієнта розсіювання та спектральних коефіцієнтів пропускання об'єктів ОЕС ДЗЗ.

Метод вимірювання абсолютної спектральної чутливості спектрального каналу сканера заснований на роздільному визначенні його відносної спектральної чутливості за допомогою монохроматичного випромінювача, що змінює довжину хвилі, і наступної абсолютизації її значення за допомогою дифузійного випромінювача, виконаного у вигляді неповної інтегруючої сфери. Монохроматичний випромінювач повинен бути прокалібрований у відносних одиницях СЩЕЯ, а дифузійний випромінювач - в абсолютних одиницях.

Метод вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання об'єктива сканера заснована на порівнянні спектральної щільності спрямованого потоку випромінювання, що падає на об'єктив паралельно головному променю його поля зору, та спектральної щільності потоку випромінювання, що пройшов через об'єктив. Вимірювання виконується спекторадіометром через отвір неповної інтегруючої сфери із складу дифузійного випромінювача СЩЕЯ її внутрішньої поверхні, які пропорційні спектральній щільності потоку випромінювання, що надходить у внутрішню порожнину сфери через цей отвір. При цьому діаметр спрямованого пучка випромінювання, що падає на об'єктив сканера, повинен бути менше діаметра вхідної зіниці об'єктива, а діаметр розбіжного пучка випромінювання, що пройшов через об'єктив, на внутрішній поверхні сфери повинен бути якнайближче до діаметра спрямованого пучка.

В дисертації досліджується новий метод вимірювання коефіцієнту розсіювання об'єктів. Стандартизований метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів базується на порівнянні освітленості  $E_1$  та  $E_2$  в зображенні чорного (не самовипромінюючого) предмета ( $E_1$ ), що розташований на рівномірному білому фоні, і в зображенні цього фону ( $E_2$ ). Освітленості вимірюють фотоелектричним способом. Коефіцієнт розсіювання об'єктива визначається відношенням  $C = E_1 / E_2$ .

Для космічних досліджень, зокрема для систем ДЗЗ, застосовуються високоякісні довгофокусні об'єктиви з великою входною апертурою. Фокусна відстань таких об'єктів дорівнює  $f' = 1000 \dots 12000$  мм, а діаметр входної зіниці –  $D_p = 200 \dots 1500$  мм. У відповідності з стандартами при  $D_p = 1500$  мм світловий діаметр коліматорного об'єктива повинен бути 1650 мм, а його фокусна відстань, а отже і внутрішній діаметр фотометричної кулі – 8250 мм. Виготовлення фотометричної кулі таких розмірів з коліматорним об'єктивом та імітатором чорного предмету, як і її експлуатація, потребує значних витрат та пов'язана зі значними технологічними та експлуатаційними труднощами.

Для розв'язання цієї задачі було проведено пошук та обґрунтування іншого методу, відмінного від стандартизованого методу визначення коефіцієнта розсіювання великогабаритних довгофокусних об'єктів, який зміг би забезпечити значне зменшення габаритів фотометричної кулі і, відповідно, витрат на виготовлення та експлуатацію установки для визначення коефіцієнта розсіювання таких об'єктів.

Коефіцієнт розсіювання  $C$  об'єктива за новим методом визначається як

$$C = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}, \quad (16)$$

де  $E_1$  – освітленість в фокальній площині об'єктива при освітленні його входного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$  на відстані  $L_{\max} \geq L \geq L_{\min}$  відповідно;  $E_2$  – освітленість в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його входного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\min}$  на відстані  $L_{\max}$ . При мінімальній відстані  $L_{\min} = 0$  ( $\alpha = \alpha_{\max}$ ) в фокальній площині об'єктива створюється освітленість  $E_1$  з найбільшим вкладом розсіяних оптичними елементами та елементами конструкції об'єктива променів (рис. 11,а), а при максимальній відстані  $L_{\max}$  ( $\alpha = \alpha_{\min}$ ) – освітленість  $E_2$  з найменшим вкладом розсіяних променів (рис. 11,б).

Таким чином, в запропонованому методу усунене обмеження на діаметр входного отвору об'єктива виробу по відношенню до внутрішнього діаметра фотометричної кулі, яке вимагається в стандартах. Ця обставина дозволяє зменшити внутрішній діаметр фотометричної кулі до 5 разів відносно діючих стандартів. Відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання знаходиться в межах  $\pm 5\%$  при значенні  $C$  не більше 0,3 і можливе подальше її зменшення до  $\pm 1\%$ . Новий метод не потребує використання коліматорного об'єктива і імітатора чорного предмету.



Додаткова діафрагма може виконуватись рухомою з можливістю її переміщення вздовж заднього фокального відрізка об'єктива на таку відстань від діафрагми фотоелектричного приймача, на якій відношення діаметра отвору додаткової діафрагми до відстані між нею і фокальною площиною об'єктива буде рівним відносному отвору об'єктива. Введення до складу установки додаткової діафрагми дозволяє визначати як значення коефіцієнта розсіювання  $S$ , так і його складові  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$ , де  $S_1$  та  $S_2$  – складові, що створюються променями, які знаходяться за межами кутової апертури об'єктива при  $L = L_{\max}$  та її приріст при зміні  $L$  від  $L_{\max}$  до  $L_{\min}$  відповідно;  $S_3$  – приріст складової, що створюється променями, які знаходяться в межах кутової апертури об'єктива, при зміні  $L$  від  $L_{\max}$  до  $L_{\min}$ . Встановлено, що сума  $S_1 + S_2 = S_M$  – є складовою коефіцієнта розсіювання  $S$ , яка викликана розсіюванням світла на поверхні внутрішніх механічних оправ об'єктива. Складова  $S_3$  коефіцієнта розсіювання, викликана розсіюванням світла оптичними елементами об'єктива при  $L = L_{\min}$ .

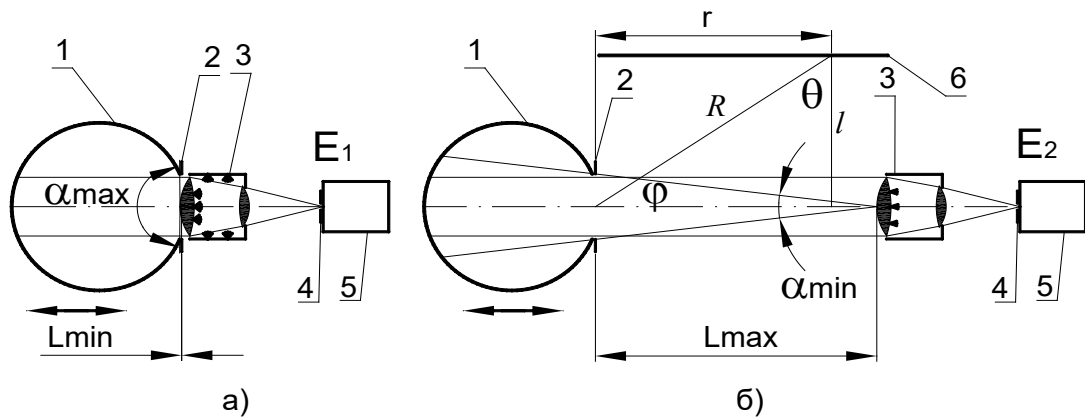


Рис. 11. Схеми розташування елементів установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів за новим методом при вимірюванні значень  $E_1$  та  $E_2$ : 1 – фотометрична куля; 2 – діафрагма кулі; 3 – об'єктив, що контролюється; 4 – діафрагма фотоприймача; 5 – фотоприймач; 6 – штора

Отже при використанні діафрагми вперше з'являється можливість розділити коефіцієнт розсіювання  $S$  об'єктива на складову, яка викликана розсіюванням світла на елементах конструкції об'єктива, і на складову, яка викликана розсіюванням світла, що виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива. Запропонований метод має дуже важливе значення для контролю якості дослідних об'єктивів при їх розробці та для контролю якості в процесі їх виробництва. При використанні додаткової діафрагми значення похибки вимірювань двома методами становило  $\pm 18\%$ , що при відносній похибці вимірювання кожним із методів  $\pm 10\%$  менше меж допустимого відхилення ( $\pm 20\%$ ). При цьому значення відносної похибки вимірювань при використанні додаткової діафрагми становило  $\pm 14\%$ .

Досліджено методи оптимізації конструкції полегшення дзеркал з урахуванням впливу сили тяжіння на деформацію дзеркал при контролі на Землі дзеркальної поверхні. Задача полегшення дзеркал - це зменшення маси

дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, при проведенні контрольних операцій та при виведенні системи на орбіту. Ступень полегшення конструкції дзеркала запропоновано визначати коефіцієнтом полегшення  $K_3^0 = (M_C - M_O) / M_C$ , де  $M_C$  – маса «суцільного» дзеркала,  $M_O$  – маса «полегшеного» дзеркала.

Структурний аналіз конструкції полегшення дзеркала було виконано за допомогою програм, які дозволяють робити аналіз конструкції методом кінцевих елементів. Була розроблена власна програма Deform, що дозволяє переводити деформацію робочої поверхні оптичних елементів під впливом різних факторів з програми ANSYS в програму ZEMAX. Ця програма дає можливість визначити числові параметри (форму, орієнтацію та положення у просторі) деформованої поверхні та зміну показника заломлення у матеріалі деталі, викликаного градієнтом розподілу об'ємних температури та навантаження. Ці результати були експортовані в сучасне програмне забезпечення розрахунку оптики для подальшого аналізу якості зображення.

За допомогою програм ANSYS та Deform було проведено оптимізацію великогабаритного вісесиметричного дзеркала для сканера ВПРЗ. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення. Найкращим кріпленням для позаосьових дзеркал є кріплення на три шарніра.

Експериментальна перевірка розробленої фізико-математичної моделі ІЧ спектро радіометра виконувалась шляхом одержання серії тестових зображень з різними параметрами (робочими спектральними діапазонами, температурами, складом оптичних мір, тощо) з наступною їх обробкою і оцінюванням основних характеристик тепловізора (просторового розділення, мінімальної роздільної різниці температур, калібрувальних коефіцієнтів та точності відтворення температури і коефіцієнта теплового випромінювання).

Для проведення експериментів було розроблено та виготовлено стенд фізичної моделі ІЧ спектро радіометра з можливістю субпіксельної обробки зображень (рис. 12), складовими якого є: пристрій формування теплових полів 1; дзеркальний коліматор 2; модель ІЧ спектро радіометру 3; блок інтерференційних світлофільтрів 4; електронний блок формування зображення 5; комп'ютер 6; монітор 7; столик з мікроподачами по трьом осям 8.

В якості тест-об'єкта для вимірювання МРРТ застосовувались міри Фуко, які мають чорну поверхню, що випромінює з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього повітря. Безпосередньо за мірою розташовано фоновий випромінювач у вигляді пластини з міді із чорною поверхнею, що випромінює з температурою, яка може змінюватися за допомогою чотирьох елементів Пелтьє в більшу або меншу сторону відносно температури навколишнього повітря. На фоновій пластині та мірах розташовані температурні датчики, які з'єднані з електронним блоком формування різниці

температур, за допомогою якого задається необхідний температурний контраст  $\Delta T$  між фоном та мірою. Керування електронним блоком та контроль температури ведеться за допомогою спеціального програмного забезпечення через комп'ютер. Похибка вимірювання різниці температур  $\Delta T$  складає  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

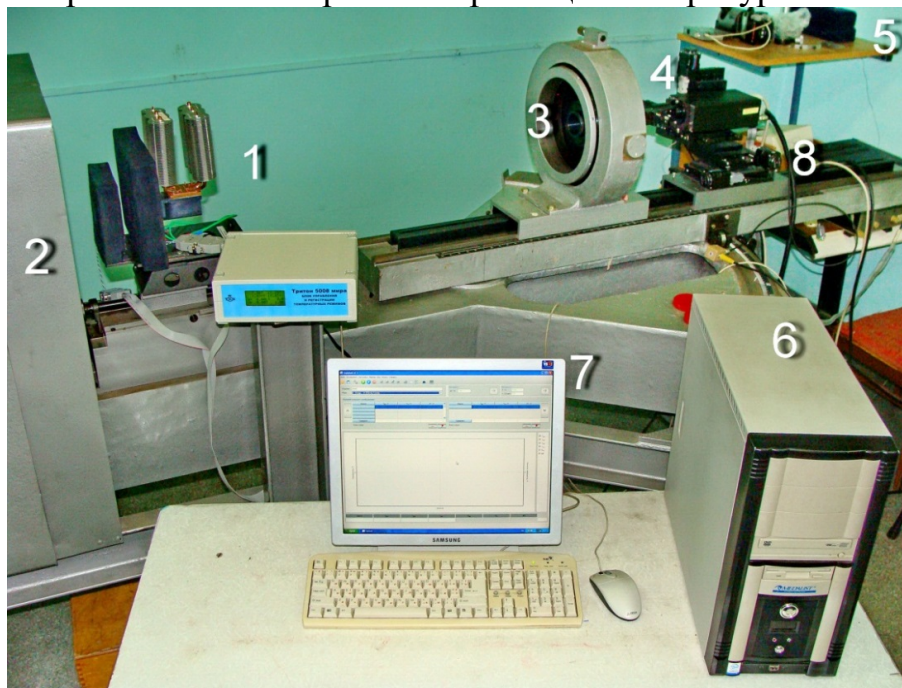


Рис. 12. Стенд для дослідження ІЧ спектродіометра

За дзеркальним коліматором був встановлений об'єктив, якість зображення якого досліджувалася. Об'єктив мав такі параметри: фокусна відстань 102,7 мм; відносний отвір 1:1,37; робочий спектральний діапазон 8...14 мкм; поле зору  $11^{\circ}$ ; коефіцієнт передачі контрасту на частоті Найквіста не менше 0,42. Зображення мір Фуко реєструвалось ІЧ камерою Tau 320 47320001X-SPNLX з МБМ форматом  $320 \times 256$  і розміром пікселів  $25 \times 25$  мкм. Температурна чутливість ІЧ камери дорівнювала  $0,05\text{ K}$ .

Для вимірювання МРРТ спектродіометра без субпіксельної обробки зображення і за допомогою обробки двох зображень, що зміщені один відносно одного по двом координатам на визначену частину пікселя, проводилася реєстрація цих зображень при різній різниці температур в кожному з робочих спектральних діапазонів. Очікувані теоретичні значення МРРТ без застосування субпіксельної обробки та апроксимовані значення МРРТ за результатами розділення зображень спостерігачами після субпіксельної обробки наведені на рис. 13. Із графіків видно, що за рахунок обробки двох зображень, які субпіксельно зміщені один відносно одного на певну частину пікселя по двом осям, відбувається підвищення просторового розділення системи при одному і тому ж температурному контрасті тест-об'єкта. На низьких просторових частотах вплив субпіксельної обробки знижується. При цьому спостерігається підвищення розділення на частоті Найквіста приблизно в 1,4 рази при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень, яке збільшується з збільшенням просторової частоти.

Таким чином, експериментальні дослідження МРРТ ІЧ спектродіометра

свідчать про те, що при застосуванні субпіксельної обробки двох кадрів, отриманих субпіксельною реєстрацією в декількох спектральних діапазонах, відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні.

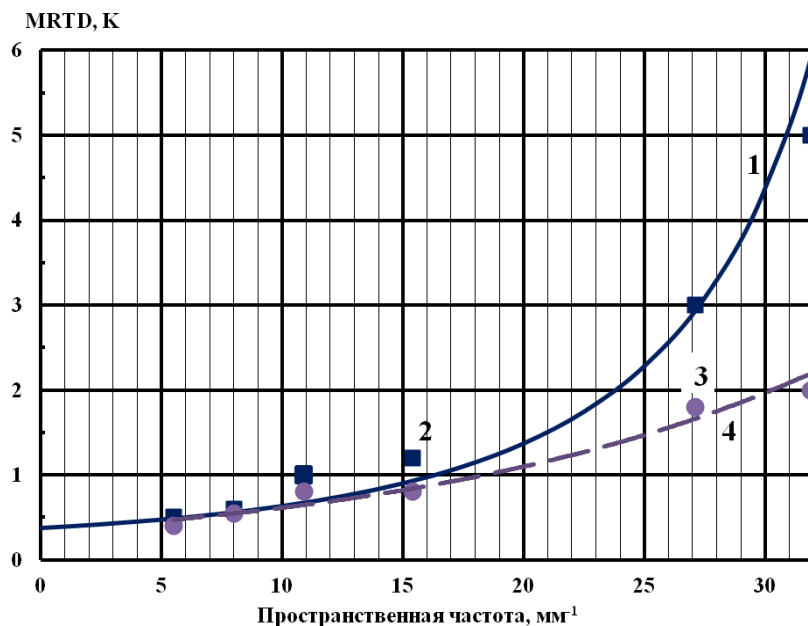


Рис. 13. Мінімальна роздільна різниця температур  $MRTD (v_x)$  з тепловізора з МБМ:  
 1 – без обробки (теоретичні значення);  
 2 – без обробки (експериментальні значення); 3 – після обробки (експериментальні значення);  
 4 – апроксимація експериментальних значень після субпіксельної обробки

Було проведено дослідження методів вимірювання температури ІЧ камерою за допомогою стенду, що наведений на рис. 12. Для дослідження спектрального коефіцієнта випромінювання теплових мір були використані міри, виготовлені з полірованого алюмінію ( $\epsilon \leq 0,1$ ), полірованої латуні ( $\epsilon = 0,3$ ) необробленого свинцю ( $\epsilon = 0,4$ ), цегли ( $\epsilon = 0,65..0,75$ ), скла ( $\epsilon = 0,85$ ); папіру ( $\epsilon = 0,95$ ). Спектральні коефіцієнти теплового випромінювання тестових зрізків розраховувалися за результатами вимірювання їх коефіцієнтів спектрального відбиття  $\rho(\lambda)$  згідно закону Кірхгофа:  $\epsilon(\lambda)$ . Проведено порівняння розрахованих за результатами моделювання тестових зразків коефіцієнтів теплового випромінювання в кожному робочому спектральному діапазоні та визначених за розробленим алгоритмом результатів обробки вимірювань на стендовому макеті ІЧ спектрорадіометра.

Комп'ютерні дослідження за допомогою програми ZEMAX оптичних систем об'єктивів, які були розраховані за допомогою розроблених методів проектування об'єктивів для систем ДЗЗ з заданими властивостями, що були розглянуті в розділі 3, підтвердили ефективність цих методів.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова проблема підвищення просторового та енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою підвищення їх характеристик шляхом розробки нових методів проектування та контролю їх основних характеристик.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі

наукові результати:

1 Аналіз основних існуючих космічних оптико-електронних систем (ОЕС) ДЗЗ, їх характеристик та тенденцій розвитку цих систем дав можливість класифікувати їх на системи спостереження високого (СВПР) та надвисокого просторового розділення (СНВПР), інфрачервоні системи та гіперспектральні.

1.1. ОЕС високого та надвисокого розділення використовують в об'єктивах дзеркальну схему Корша, або дзеркально-лінзову схему Рітчі-Кретена й мають діаметр вхідної зіниці більшим за 500 мм, фокусну відстань від 5000 мм до 13000 мм і ширину смуги огляду від 9,4 км до 55 км.

1.2. Більшість ІЧ сканерів для формування зображення використовують оптико-механічне сканування і тільки в сканерах Bird і в NIRST використовується метод “push-broom” сканування ПЗЗ-лінійкою.

1.3. Одним із перспективних напрямків космічних досліджень поверхні Землі є використання гіперспектрометрів, які мають просторове розділення 30...70 м і спектральне розділення порядку 10 нм.

2. Удосконалено фізико-математичну модель СВПР і СНВПР шляхом врахування впливу особливостей експлуатації сканерів на їх МПФ, дослідження якої дало можливість:

2.1. Отримати формулу для знаходження необхідного діаметра апертури об'єктива  $D_p$  залежно від заданого просторового розділення, висоти орбіти супутника, робочого спектрального діапазону оптичної системи, необхідного значення МПФ об'єктива на частоті Найквіста та коефіцієнту екранування об'єктива. Показано, що оптимальним діаметром апертури  $D_p$  для отримання просторового розділення, близького до геометричної проекції пікселя  $GSD$ , є діапазон  $320 \leq D_p \cdot GSD \leq 370$ , при якому МПФ на частоті Найквіста знаходиться в межах  $0,21 \leq M(\nu_N) \leq 0,26$ .

2.2. Розроблено математичну модель для дослідження впливу на МПФ сканера нестабільності положення осі і вібрацій космічного апарату (КА), нестабільності висоти польоту КА, обертання земної кулі, відхилення візирної осі від надиру при зйомці з змінними кутами візування.

3. Запропоновано абераційні моделі нових оптичних систем сканерів СВПР і СНВПР, які дозволили дослідити три об'єктива. Вперше отримано аналітичні залежності, що зв'язують конструктивні параметри об'єктивів для отримання дифракційної якості зображення, які покладені в основу експрес-методу розрахунку двох типів об'єктивів - трьохдзеркального квазіортоскопічного об'єктива з позаосьовим збільшеним полем зору та трьохдзеркального вісесиметричного об'єктива.

4. Удосконалена модель ІЧ системи спостереження, яка враховує особливості її застосування на КА з метою підвищення якості зображення.

4.1. На основі цієї моделі отримано нове рівняння для розрахунку основної характеристики космічного тепловізора – мінімальної роздільної різниці температур (MPRT), яке враховує роботу тепловізійної камери без участі спостерігача.

4.2. Запропоновано новий метод для підвищення просторового розділення в ІЧ багатоспектральних космічних ОЕС ДЗЗ, який полягає в сумісній обробці субпіксельно зміщених зображень від різних спектральних діапазонів, які попередньо перераховані на єдину фізичну величину, незалежну від спектрального діапазону, температури Земної поверхні.

4.3. Запропоновано новий підхід та отримані аналітичні залежності розрахунку трьохлінзового атермального об'єктиву для ІЧ області спектру, які поєднують вибір характеристик матеріалів, оптичних сил лінз та відстаней між ними для утримання площини фокусування об'єктиву в площині фотоприймача при різних температурах експлуатації ОЕС. Це дозволило розрахувати трилінзовий об'єктив, що має фокусну відстань 112 мм, відносний отвір 1:1, що може працювати без терморозфокусування в діапазоні температур від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

5. Проведені дослідження оптичних систем сучасних гіперспектретрів з диспергуючими елементами у вигляді дифракційних ґраток і призм, а також Фур'є-спектретрів дозволили встановити їх переваги і недоліки. Запропоновано оптичну схему перспективного супутникового гіперспектретра з покращеними характеристиками: робочий спектральний діапазон –  $0,4\ldots 2,5$  мкм; спектральне розділення –  $6\ldots 30$  нм; кількість спектральних каналів – 150; просторове розділення на місцевості – 45 м; ширина смуги огляду – 46 км.

6. Розроблено нові методи вимірювання основних характеристик космічних ОЕС, а саме: геометричне і радіометричне калібрування, коефіцієнт розсіювання об'єктів, деформація дзеркал об'єктива. Дослідження цих методів дозволило отримати такі результати:

6.1. Розроблено метод геометричного калібрування ОЕС ДЗЗ з застосуванням еталонного контрольного елемента. Для реалізації даного методу був розроблений колімаційний вимірювальний комплекс і алгоритм розрахунку кутового положення оптичної осі об'єктива відносно ПЗЗ-лінійки.

6.2. Розроблено метод вимірювання абсолютної спектральної чутливості спектрального каналу сканера заснований на роздільному визначенні його відносної спектральної чутливості, за допомогою монохроматичного випромінювача, що перебудовується по довжині хвилі, і наступної абсолютизації її значення за допомогою дифузійного випромінювача, виконаного у вигляді неповної інтегруючої сфери та використанні абсолютного радіометру.

6.3. Вперше запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнтів розсіювання об'єктів, який базується на порівнянні освітленостей в фокальній площині об'єктива виробу при освітленні його вхідного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно вхідного отвору об'єктива, що забезпечує в порівнянні з стандартизованою установкою: зменшення внутрішнього діаметру фотометричної кулі (напівкулі) до 5 разів; зменшення відносної похибки вимірювання від 2 до 10 разів; зниження вимоги до яскравості темного фону



порівняно з вимогою до яскравості чорного предмета від 27 до 53 разів; розширення функціональних можливостей контролю - є можливість визначати кількість розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування вздовж оптичної осі об'єктива та вклад кожного з них у величину коефіцієнта розсіювання об'єктива.

6.4. Запропоновано новий метод моделювання полегшення дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, проведенні контрольних операцій та виведенні супутника на орбіту. Найбільш оптимальним варіантом полегшення такого дзеркала є шестикутні отвори в задній стінці дзеркала з кріпленням дзеркала на три отвори в задній частині дзеркала. Коефіцієнт полегшення такого дзеркала сягає 75%, а деформація робочої поверхні в 10 разів менше, ніж у дзеркала без полегшення.

6.5. З метою підтвердження результатів моделювання тепловізійної камери з мікроболометричною матрицею космічного базування було проведено експериментальне дослідження камери шляхом вимірювання МРРТ. Отримані результати підтвердили отриману формулу для розрахунку МРРТ і підвищення роздільної здатності на частоті Найквіста в 1,4 рази при застосуванні субпіксельної обробки зображень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тягур В.М. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікроболометричних камер : монографія / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко. – Київ: «Вік прінт», 2018. – 223 с.

*Здобувачем зроблено аналіз мікроболометричних передавальних камер для дистанційного зондування Землі із космосу.*

2. Тягур В.М. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2012. – №5. – С.114–117. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем запропоновано і досліджено метод ахроматизації оптичних систем об'єктивів для тепловізорів.*

3. Тягур В.М. Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2013. – Вип. 3. – С. 27–32. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Emerging Sources Citation Index (ESCI), Bielefeld Academic Search Engine (BASE) та інших).

*Здобувачем запропоновано новий метод для вимірювання коефіцієнтів розсіювання.*

4. Тягур В.М. Мінімальна роздільна різниця температур тепловізора космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. – №1. – С. 23–27. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

*Здобувачем запропонована і досліджена модель космічного тепловізора, яка не враховує дисплей і оператора.*

5. Тягур В.М. Установка для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктів у відповідності з новим методом його визначення / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Український метрологічний журнал. – 2014. – Вип. 1. – С. 26–34. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Emerging Sources Citation Index (ESCI), Bielefeld Academic Search Engine (BASE) та інших).

*Здобувачем розроблено структурну схему установки для вимірювання коефіцієнта розсіювання об'єктів.*

6. Тягур В.М. Математическое моделирование тепловизионного прибора наблюдения с микроболометрической матрицей / В.М. Тягур, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // «Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування» – 2014. – №48 (2). – С. 28–38. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PIIIC, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

*Здобувачем досліджена модуляційна передавальна функція тепловізора з микроболометричною матрицею.*

7. Тягур В.М. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Космічна наука і техніка. – 2014. – Т. 20. – №5. – С. 35–40. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

*Здобувачем запропонована класифікація зображуючих Фур'є-спектрометрів.*

8. Тягур В.М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем зрения / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит // Космічна наука і техніка. – 2015. – Т. 21. – №2. – С. 27–33. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

*Здобувачем запропонована нова оптична система тридзеркального анастигматичного об'єктива з позаосьовим полем зору.*

9. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт // Наука та інновації, 2015. – Т.11. – № 6. – С.16–28.

*Здобувачем досліджено метод підвищення роздільної здатності спектрорадіометра при реєстрації субпіксельно зміщених зображень.*

10. Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2017. – №2. – С.89–96. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем запропоновано математичну модель для розрахунку деформації поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.*

11. Tiagur V.M. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / V.M. Tiagur,



V.H. Kolobrodov, M.I. Lykholit, V.I. Mykytenko, C.V. Dobrovolska // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotechnika Radioaparatabuduvannia. – 2017. – Iss. 69. – P. 30–34.. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ та інших).

*Здобувачем розроблена геометрична модель для дослідження енергетичного розділення оптико-електронної системи космічного сканера.*

12. Тягур В.М. Оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності / В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 53(1) – С.16–24. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PIIЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

13. Tiagur V. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Tiagur, V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – №4/9 (88). – С.46–53. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Scopus та інших).

*Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку оптичних дзеркал при наявності деформацій.*

14. Тягур В.М. Тридзеркальний анастигматичний осесиметричний об'єктив з виправленою дисторсією / В.М. Тягур // Космічна наука і техніка. – 2017. – Т. 23. – №5. – С. 55–61.

15. Тягур В.М. Просторове розділення системи дистанційного зондування при зміні кута візування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №1. – С. 54–64. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем досліджено процес зміни форми проекції пікселя сканера на поверхні Землі при зміні кута візування.*

16. Тягур В.М. Вплив кутів візування та кривизни поверхні Землі на просторове розділення космічної оптико-електронної системи спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №5. – С.63–75. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем отримана формула для дослідження просторового розділення сканера, яка враховує кривизну поверхні Землі.*

17. Тягур В.М. Модуляційна передавальна функція системи дистанційного зондування при відхиленні осі візування від надира / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2018. – №6. – С.51–65. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем досліджена МПФ ОЕС при відхиленні осі візування від надира.*

18. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров сканеров дистанционного зондирования Земли / В.М.Тягур, Т.Н. Генсичкая, Т.И. Гураль // Наукові вісті НТТУ «КПІ». – 2019. – №1. – С.44–51. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

*Здобувачем запропоновано метод геометричної калібровки кутових параметрів сканера ДЗЗ.*

19. Тягур В.М. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Попов М.А., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Лихолит Н.И., Полежаев В.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей, Т.7, №2, М., ООО ДоМира, 2010. С. 293-299. (Закордонне видання).

*Здобувачем запропоновано і розглянуто оптимальний склад бортового оптико-електронного комплексу перспективного супутника ДЗЗ.*

20. TYAGUR Vladimir M. Satellite imagery resolution enhancement using subpixel frames acquisition / Sergey A. STANKEVICH, Sergey V. SHKLYAR, Vladimir M. TYAGUR // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2013. – Vol 11. – No. 2 – P.135–145. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

*Здобувачем запропоновано метод розрахунку роздільної здатності при реєстрації субпіксельно зміщених зображень.*

21. Тягур В.М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового апохромата / В.М. Тягур, О.К. Кучеренко, А.В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №4. – С.42–47. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus та інших).

*Здобувачем розроблена система рівнянь для розрахунку параметрів ІЧ об'єктива з мінімальними термічними і хроматичними абераціями.*

22. Tyagur V.M. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / Tyagur V.M., Lyalko, Popov V.A., Stankevich S.A., Shklayr S.V., Podorva N.V., Likholt N.I., C.V. Dobrovolska C.V. // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol. 12. – No. 2 – P.153–164. (Закордонне видання індексується в наукометричних базах EBSCOhost, Compendex, Scopus, Inspec, ProQuest, Science Citation Index Expanded, and the Web of Science).

*Здобувачем запропонована оптична система космічного спектро радіометра високого просторового розділення.*

23. Патент України на винахід №94157 Україна, МКВ G02B 23/02. Спосіб створення електронного зображення Землі у космічному сканері і пристрій для його реалізації / Тягур В.М., Гринюк І.Є., Лихоліт М.І., Пасько І.М., (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94157; заявл. 25.09.2009 а200909785; опубл. 11.04.2011, Бюл. №7.

*Здобувачем досліджено спосіб формування зображення за допомогою оптико-електронного сканера космічного базування.*

24. Патент України на винахід №94303 МКВ G02B 17/00 Три дзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І.,

Гринюк І.Є. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №94303; заявл. 08.07.2009 а200907107; опубл. 26.04.2011, Бюл. №8.

*Здобувачем запропоновано оптичну систему три дзеркального анастигматичного об'єктива для сканера високого розділення.*

25. Патент України на винахід №96354 МКВ G06K 9/64 Пристрій для підвищення просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об'єктів / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Ковальчук С.П., Ліхоліт М.І., Полежаєв В.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №96354; заявл. 01.03.2010 а201002315; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.

*Здобувачем досліджено метод підвищення просторового розділення багато спектрального космічного сканера.*

26. Патент України на винахід №99217 МКВ G01J 3/12. Призмовий спектрометр / Тягур В.М., Кислий В.П., Леваш Л.В., Ліптуга А.І., Прохорович А.В. (Україна); заявник Інститут фізики напівпровідників. - №99217; заявл. 24.05.2011 а201106550; опубл. 25.07.2012, Бюл. №14.

*Здобувачем запропоновано ввести до спектрометра додаткове дзеркало.*

27. Патент України на винахід №103242 МКВ G01M 11/02, G02B 13/00. Пристрій для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів та виробів на їх основі і спосіб його використання / Тягур В.М., Камінський С.Ф., Лихоліт М.І. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №10342; заявл. 08.12.2011 а201114581; опубл. 25.09.2013, Бюл. №18.

*Здобувачем розроблено алгоритм вимірювання коефіцієнта розсіювання.*

28. Патент України на винахід №108282 МКВ G02B 9/14; G02B 13/14 . Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектра / Тягур В.М., Лихоліт М.І., Варьонова Г.Л. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №108282; заявл. 04.07.2013 а201308394; опубл. 10.04.2015, Бюл. №7.

*Здобувачем досліджено термічні аберації ІЧ об'єктива.*

29. Патент України на винахід №109181 МКВ G01C 3/08 Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення/ Тягур В.М., Лихоліт М.І., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Харитоненко К.В. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №109181; заявл. 17.09.2013 а201311086; опубл. 27.07.2015, Бюл. №14.

*Здобувачем запропоновано метод формування субпіксельно зміщених зображень.*

30. Патент України на винахід №113104 МКВ G02B 17/00; G02B 17/06. Тридзеркальний анастигматичний бездисторсійний об'єктив / Тягур В.М., Лихоліт М.І. (Україна); заявник КП СПБ «Арсенал». - №113104; заявл. 22.04.2015 а201503823; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23.

*Здобувачем оптимізовано конструктивні параметри тридзеркального анастигматичного об'єктива.*

31. Патент України на винахід №117909 МКВ G01C 3/08 Інфрачервоний матричний знімальний спектро радіометр субпіксельної розрізненості / Тягур В.М., Попов М.О., Станкевич С.А., Лялько В.І., Лихоліт М.І., Добровольська К.В. (Україна); заявник НЦАКДЗ ІГН. - №117909; заявл. 04.11.2014 а201411946; опубл. 25.10.2018, Бюл. №20.

*Здобувачем запропоновано перераховувати зображення різних спектральних каналів на єдину фізичну величину.*

32. Тягур В.М. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, В.В. Полежаєв С.А. Станкевич С.А. // Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції з запрошенням закордонних учасників. – Київ. – 2008. – С. 23–25.

*Здобувачем проаналізовані досягнення і проблеми розвитку ОЕС ДЗЗ.*

33. Тягур В.М. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций / М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, Н.И. Лихолит, В.В. Полежаев // Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”. – Крым. – 2009. – С. 50–65.

*Здобувачем обґрунтовані можливість використання космічних гіперспектрометрів в різних сферах народного господарства.*

34. Тягур В.М. Программа расчета дифракционных компенсаторов для контроля асферических поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.67–68.

*Здобувачем розроблено програму для розрахунку оптичних елементів.*

35. Тягур В.М. Программа для расчета энергетических и пространственных характеристик сканера дистанционного зондирования Земли поверхностей / В.М. Тягур, А.П. Чумак, О.Ю. Сахарнова // Збірник тез доповідей IX науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2010. – С.68–69.

*Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку просторового розділення сканера системи ДЗЗ.*

36. Тягур В.М. Оптическая система гиперспектрометра для дистанционного зондирования Земли / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С.51–52.

37. Тягур В.М. Оптические системы инфракрасных объективов для охранных систем наблюдения / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, А.Л. Варенова, И.В. Вовк, В.М. Кузнецов // Збірник тез доповідей X науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2011: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2011. – С. 52–53.

*Здобувачем розроблені дві оптичні системи ІЧ об'єктивів тепловізорів.*

38. Tiagur V.M. Design of compact multiband satellite imager using complex

mathematical model / A.L. Makarov, L.V. Varichenko, N.I. Lykholit, I.E. Hrynyuk, V.M. Tiagur, V.F. Tkachenko, R.V. Kurdydyk // Proc. SPIE 8011, 80111T. Abstracts book of 22<sup>nd</sup> General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22). – Puebla: Mexico. – 2011. – P.151–152.

*Здобувачем досліджена фізико-математична модель багатоспектральної супутникової системи спостереження.*

39. Тягур В.М. Оптические системы многоспектрального сканера и сканера среднего ИК-диапазона для дистанционного зондирования Земли / Тягур В.М., Рыбак В.В. // Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований». – Алматы: Казахстан. – 2011. – С. 27.

*Здобувачем запропоновано оптичні системи спектрального сканера ДЗЗ.*

40. Тягур В.М. Метод калибровки угловых параметров ОЭП / В.М.Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсницкая, Н.И., П.В. Соболев // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2012. – С. 52–53.

*Здобувачем розроблено метод і апаратуру для кутової калібровки ОЕП.*

41. Тягур В.М. Субпиксельная обработка инфракрасных космических изображений с целью підвищення їх роздільної здатності / В.М.Тягур, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, К.В. Харитоненко // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2012. – С. 53–54.

*Здобувачем запропоновано алгоритм обробки субпиксельних зображень.*

42. Тягур В.М. Новый метод визначення коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт М.І. // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2012. – С. 55–56.

*Здобувачем розроблено модель визначення розсіювання об'єктива.*

43. Тягур В.М. Установка для визначення, у відповідності з новим методом, коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2012. – С. 56–57.

*Здобувачем запропонована схема для вимірювання розсіювання.*

44. Тягур В.М. Удосконалення установки для визначення по новому методу коефіцієнту розсіювання об'єктів та виробів на їх основі / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей XI науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КП”. – 2012. – С. 58–59.

*Здобувачем удосконалена схема для вимірювання розсіювання в об'єктиві.*

45. Тягур В.М. Мікроболометрична матрична камера дальнього інфрачервоного діапазону для космічної зйомки / В.М. Тягур, М.О. Попов, М.І. Лихоліт, С.А. Станкевич, О.В. Тітаренко // Збірник тез доповідей XI науково-

технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2012. – С. 68–69.

*Здобувачем запропонована модель космічного тепловізора на МБМ.*

46. Тягур В.М. Атермальный объектив для ИК-сканера ДЗЗ, работающий в диапазоне температур  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  / В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, А.Л. Варенова, В.И. Парубец // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 61–62.

*Здобувачем розроблена система рівнянь для проектування ІЧ об'єктива.*

47. Тягур В.М. Апаратура для контролю тепловизионных приборов / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Т.Н. Генсичкая, Н.И. Овчар, В.П. Соболев // Збірник тез доповідей XII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2013. – С. 62–63.

*Здобувачем розроблена структура стенду для вимірювання МРРТ.*

48. Tyagur V. Subpixel Resolution Satellite Imaging Technique / V. Tyagur, S. Stankevich, S. Shklyar // Digital Technologies, Proceedings of the Ninth International Conference. – ZILINA, SLOVAKIA. – 2013. – P. 81–84.

*Здобувачем досліджено метод субпіксельної обробки ІЧ зображень.*

49. Тягур В.М. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.41–27.44.

*Здобувачем обґрунтована можливість використання МБМ в ОЕС ДЗЗ.*

50. Тягур В.М. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Матеріали XI наук.-техн. конференції «ABIA-2013». – Київ. – С. 27.52–27.56.

*Здобувачем запропоновано нові критерії оцінки ефективності ІЧ ОЕС.*

51. Тягур В.М. Основные характеристики ИК камер для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Е.В. Добровольская // Тези доповідей XIII наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.; НТТУ “КПІ”. – 2014. – С. 47.

*Здобувачем запропоновано основні характеристики ІЧ камер ДЗЗ.*

52. Тягур В.М., Оптичні системи зображуючих Фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / Н.И.. Лихолит, В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIII конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2014. – С. 64–65.

*Здобувачем проведено розрахунок оптичної системи спектрометра.*

53. Tyagur V. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, V. Lyalko, S. Shklyar, C. Dobrovolska, N. Likholyt // Digital Technologies, Proceedings of the 10th International Conference. – 2014. – ZILINA, SLOVAKIA. – P. 232–235.

*Здобувачем обґрунтована доцільність використання субпіксельних кадрів.*

54. Tyagur V. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / V. Tyagur, S. Stankevich, M. Popov, S. Shklyar, C. Dobrovolska // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С.72.

*Здобувачем досліджена модель нового ІЧ спектрорадіометра.*

55. Тягур В.М. Математична модель тепловізійної камери космічного базування з субпіксельною реєстрацією зображень / В. М. Тягур, К.В. Добровольська, М. І. Лихоліт, Колобродов В.Г. // Тези доповідей на 14-й Українській конференції з космічних досліджень. – Ужгород. – 2014. – С. 74.

*Здобувачем досліджена математична модель тепловізора з субпіксельною обробкою зображень.*

56. Тягур В.М. Объективы систем ДЗЗ КП СПС «Арсенал» / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 28–32.

57. Тягур В.М. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С. 33–35.

*Здобувачем запропоновано метод підвищення розділення ІЧ камери.*

58. Тягур В. М. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.І. Лихоліт, К.В. Добровольська та інші // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.47–50.

*Здобувачем досліджено просторове розділення ІЧ камери ДЗЗ.*

59. Тягур В.М. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Збірник тез конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.53–55.

*Здобувачем досліджена модель зображуючого фур'є-спектрометра.*

60. Тягур В.М. Исследование характеристик аппаратуры контроля тепловизионных систем с использованием аппаратуры контроля “IRVISION” / В.М. Тягур, Т.И. Гураль, Н.И. Овчар, Р.Б. Рысов, В.П. Соболев // Збірник тез доповідей Української наукової конференції «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.122–125.

*Здобувачем розроблено методики проведення контролю тепловізорів.*

61. Тягур В.М. Метод та обладнання для визначення коефіцієнта розсіювання знімальних об'єктивів та об'єктивів для спостереження / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт // Збірник тез доповідей конфер. «Авіакосмічне приладобудування». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2014. – С.126–130.

*Здобувачем запропоновано метод вимірювання коефіцієнта розсіювання.*

62. Тягур В.М. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического

базирования / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихоліт // Збірник тез доповідей XIV наук.-техн. конфер. “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С. 69–70.

*Здобувачем запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива і МБМ.*

63. Тягур В.М. Математичне моделювання зображувального Фур'є-спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В. М. Тягур, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XIV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2015. – С.71.

*Здобувачем досліджена модель зображувального спектрометра для ДЗЗ.*

64. Tiagur V.M. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / V. M. Tiagur, S.A. Stankevich, C. V. Dobrovolska, N.S. Lubsky N.S. // Збірник тез доповідей 15 Української конференції з космічних досліджень. – Одеса. – 2015. – С. 212.

*Здобувачем запропоновано метод вимірювання випромінювання Землі.*

65. Тягур В.М. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С. 35–36.

*Здобувачем запропоновано метод контролю контролю форми дзеркал.*

66. Тягур В.М. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XV науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – Київ: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2016. – С. 36–37.

*Здобувачем досліджена модель полегшення дзеркал космічного базування.*

67. Тягур В.М. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 195.

*Здобувачем отримано МПФ МБМ з субпиксельною реєстрацією зображень.*

68. Тягур В.М. Анализ влияния деформаций оптических поверхностей на качество изображения в сканерах ДЗЗ/В.М. Тягур, К.А. Нгуен, В.М. Сокуренок // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 209.

*Здобувачем проведено аналіз впливу деформацій дзеркала на його ФРТ.*

69. Тягур В.М. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів ДЗЗ на деформацію їх оптичної поверхні / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 218.

*Здобувачем розроблена модель деформації поверхні дзеркала.*

70. Тягур В.М. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.М. Тягур, Н.І. Лихоліт, В.І. Лялько,



М.О. Попов, С.А. Станкевич, К.В. Добровольская // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса. – 2016. – С. 225.

*Здобувачем запропоновано метод підвищення розділення спектрорадіометра.*

71. Тягур В.М. Оптико-електронные системы ДЗЗ сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур // Тези доповідей конференції «16 Українська конференція з космічних досліджень». – Одеса – 2016. – С. 228.

72. Tiagur V.M. Three-mirror anastigmatic quasi-ortoscopic lens / V.M. Tiagur // Proceeding of 2016 China-Ukraine forum on Science and Technology. – 2016. – P. 132.

73. Тягур В.М. Оценивание параметров тепловизионных систем наблюдения на аппаратуре контроля «IR VISION» / Гураль Т.И., Тягур В.М., Лихолит Н.И., Овчар Н.И., Кирилюк Н.Е // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 63–65.

*Здобувачем розроблено метод вимірювання характеристик тепловізора.*

74. Тягур В.М. Мінімальна сприймаюча різниця температур тепловізора / В.М. Тягур, М.М. Луцюк, В.Г. Колобродов // Збірник тез доповідей 2-ої Української наукової конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 65–68.

*Здобувачем обґрунтована доцільність використання мінімальної сприймаючої різниці температур.*

75. Тягур В.М. Использование модели функции рассеяния точки объектива для повышения разрешения изображений ИК камер при дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, Е.В. Добровольская, П.А. Кондратов, А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2016. – С. 182–185.

*Здобувачем отримано аналітичний вираз функції розсіювання точки.*

76. Тягур В.М. Метод контролю форми асферичних дзеркал / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей XVI наук.-техн. конф. «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». – К.: ПФБ НТТУ «КПІ». – 2017. – С. 32–33.

*Здобувачем запропоновано метод контролю асферичних дзеркал.*

77. Тягур В.М. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / В.М. Тягур, Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 6-й Международной конференции «Космические технологии: Настоящее и будущее». – Днепр. – 2017. – С. 80.

*Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання кріплення дзеркал.*

78. Tiagur Volodymyr M. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Volodymyr M. Tiagur Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik // Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. – 2017. – 104450J.

*Здобувачем отримана формула для дослідження просторового розділення сканера при зміні кута візування.*

79. Тягур В.М. Тенденції розвитку систем ДЗЗ / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 3-ої наук.-техн. конфер. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 18–19.

80. Тягур В.М. Сканер сверхвысокой разрешающей способности / В.М. Тягур, А.С. Притула // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С.112–113.

*Здобувачем запропоновано схему довгофокусного дзеркального об'єктива.*

81. Тягур В.М. Повышение разрешения изображений ИК камер при дистанционном зондировании Земли / В.М. Тягур, П.А. Кондратов, Е.В. Добровольская, П.А. А.Г. Оганесян, В.Ф. Ткаченко // Збірник тез доповідей 3-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 131–134.

*Здобувачем досліджено метод підвищення просторового розділення ІЧ камер, який ґрунтується на узгодженні параметрів об'єктива і МБМ.*

82. Тягур В.М. Оцінка ефективності тепловізійних та телевізійних космічних систем спостереження / В.М. Тягур, В.Г. Колобродов, Б.Ю. Пінчук // Збірник тез доповідей наук.-техн. конф. «Спеціальне приладобудування: Стан та перспективи». – К.: КП СПБ «Арсенал». – 2018. – С. 134–137.

*Здобувачем запропоновано для оцінки ефективності використовувати просторове і енергетичне розділення.*

83. Тягур В.М. Оптимізація габаритно-вагових параметрів систем ДЗЗ надвисокої просторової роздільної здатності / В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVII науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. – К.: ПФБ НТТУ “КПІ”. – 2018. – С. 37–38.

## АНОТАЦІЯ

**Тягур В.М. Підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 - Оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми підвищення просторового і енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) шляхом удосконалення методів проектування та контролю їх основних характеристик.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, методи проектування дзеркальних об'єктивів, сканери високого розділення, методи і апаратура контролю оптичних систем.

## АННОТАЦИЯ

**Тягур В.М. Повышение пространственного и энергетического разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 - Оптические приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы повышения пространственного и энергетического разрешения в космических оптико-электронных системах (ОЭС) дистанционного зондирования Земли путем усовершенствования методов проектирования и контроля их основных характеристик.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, методы проектирования зеркальных объективов, сканеры высокого разрешения, методы и аппаратура контроля оптических систем.

## ABSTRACT

**Tiagur V.M. Increase spatial and radiometric resolution of space optical-electronic systems of remote sensing of Earth. - Qualification scientific work is manuscript copyright.**

Thesis for the *scientific degree of Doctor* of technical sciences in specialty 05.11.07 - Optical devices and systems. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to solving the scientific problem of improving image quality in space optical-electronic systems (OES) of remote sensing of the Earth by improving methods of design and control of their main characteristics.

The **first section** substantiates the need to create an OES with high spatial resolution (HSR, which is based on an analysis of existing systems, their characteristics and development trends. Modern satellite ERS may include multispectral and hyperspectral scanners, space thermal imagers (STI). The most important characteristics of such systems are spatial, energy and spectral resolution, capture bandwidth, number of spectral channels.

In the **second section** an improved model of the OES of space HSR scanners is investigated. It allowed us to determine the optimal parameters of the lens. A formula is obtained to find the required diameter of the lens aperture depending on a given spatial resolution. The formulas of modulation transfer functions (MTF) of the model individual components were obtained, which depend on the operating conditions of the scanner.

The **third section** researches the optical systems of the HSR scanners lenses, which should have significant focal lengths. Aberrational models of new optical systems of HSR lenses are proposed. As a result of the models research, new formulas of the dependence of the lens design parameters on the distances between

mirrors are obtained to correct all five third-order aberrations in the lens. The scanner optical system was optimized and new system with an additional projection lens was proposed.

The **fourth section** is devoted to the improvement and research of the STI model in order to increase its spatial and energy resolution. Based on this model, a new formula for the minimum resolving temperature difference of STI was obtained. To increase the spatial resolution of STI, a method for obtaining and processing Subpixel-shifted images is proposed. It is carried out by turning the thermal imager relative to the direction of satellite flight.

The **fifth section** presents the results of a research of the advantages and disadvantages of optical systems of hyperspectrometers that use prisms and diffraction gratings, as well as imaging Fourier spectrometers. As a result of the research, the technical requirements for a promising hyperspectrometer for future Ukrainian ERS satellites are formulated.

The **sixth section** is devoted to the development of methods for measuring and researching the basic characteristics of the space OES ERS. New methods have been developed for the geometric and radiation calibration of the OES, which must be performed before launching the spacecraft.

A new method is proposed for measuring the scattering coefficient of lenses, which eliminates the restriction on the diameter of the entrance pupil of the lens in relation to the inner diameter of the photometric ball, which is required by the standards. The methods of design optimization the of lightening mirrors taking into account the influence of gravity on the deformation of mirrors when monitoring a mirror surface on Earth were developed. The best option for facilitating such a mirror is the hexagonal holes in the rear wall of the mirror with the mirror mounted on three holes in the rear of the mirror. A stand for the research of thermal imagers was developed and manufactured. Computer researches of lenses, which were calculated according to the developed methods, were carried out. They confirmed the effectiveness of these methods.

**Keywords:** Earth remote sensing, mirror lens design methods, high resolution scanners, optical systems control methods and equipment.

ДЛЯ НОТАТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

ДЛЯ НОТАТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Підписано до друку 8 вересня 2020р.  
Формат 60х90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсетний. Друк різнографічний.

Кількість умовних друкованих аркушів 1,9

Тираж 100 екз. Замовлення №9869.

Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру №620049 13.10.2008,  
ПРІНТЦЕНТР, м.Київ, вул. Політехнічна, 16

