

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

**ДОБРОВОЛЬСЬКА КАТЕРИНА ВОЛОДИМИРІВНА**

**УДК 621.3**

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ  
МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ ДЛЯ  
СУПУТНИКА**

**Спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи**

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ-2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів і в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» Державного космічного агентства України.

**Науковий керівник** 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, старший науковий співробітник  
**Гордієнко Валентин Іванович**,  
ДП НВК «Фотоприлад», заступник генерального директора з  
науки – головний конструктор;

кандидат технічних наук,  
**Синявський Іван Іванович**,  
Головна астрономічна обсерваторія НАН України, заступник  
начальника відділу атмосферної оптики та приладобудування;

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, навчальний корпус №1, аудиторія 293.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Н.І. Бурау

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) знаходиться в стадії інтенсивного розвитку, спричиненого вдосконаленням існуючих технічних засобів зйомки поверхні Землі та розширенням кола задач, які постають перед науковими, адміністративними, військовими та силовими структурами. Завдяки використанню космічних зображень досягається значне підвищення ефективності діяльності в народному господарстві, військовій справі та в наукових дослідженнях.

Співвідношення таких найважливіших характеристик камер космічного базування як просторова роздільна здатність та енергетична роздільна здатність безпосередньо впливає на ефективність вирішення задач ДЗЗ. Просторова роздільна здатність головним чином визначається кількістю та розмірами пікселів приймача випромінювання. Енергетична роздільна здатність залежить від просторової роздільної здатності приладу, параметрів приймача випромінювання (ПВ) тощо. В сучасних камерах космічного базування для отримання інфрачервоних (ІЧ) зображень поверхні Землі широко застосовуються неохолоджувані мікроболометричні матриці. Вони дозволяють значно зменшити вартість камери, спростити конструкцію та забезпечити достатню енергетичну роздільну здатність.

Забезпечення високої просторової роздільної здатності космічних зображень при незмінному значенні поля огляду вимагає збільшення кількості пікселів мікроболометричних матриць. Але це призводить до суттєвого ускладнення конструкції апаратури та підвищення її вартості. Крім того, технологія виготовлення пікселів приймачів накладає жорсткі обмеження на збільшення їх кількості. Відомі методи підвищення просторової роздільної здатності космічних камер без зміни параметрів ПВ часто потребують введення до камери додаткових пристроїв, які ускладнюють конструкцію. Тому підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери без конструктивних ускладнень за рахунок власного руху супутника є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» і пов'язана з наступними науково-технічними проектами та роботами, виконаними за участю автора:

- науково-технічний проект «Технологія підвищення просторової розрізненості зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи «Січ» за допомогою субпіксельного оброблення» за договором № 10 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 27.02.2013 р. № 133 (ДР № 0113U000913);
- науково-дослідна робота «Розробка методик розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» за договором № 453/4 від 29.05.2013 р.;

- науково-технічний проект «Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельного оброблення зображень» за договором № 13 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 05.03.2014 №142 (ДР № 0114U001665);

- науково-дослідна робота №2721п «Розробка методів і розрахункового інструментарію для об'єктивної оцінки просторового і енергетичного розділення космічних інфрачервоних камер дистанційного зондування Землі» (ДР № 0114U003421).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених за рахунок власного руху носія знімальної апаратури зображень.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність підвищення просторової роздільної здатності камери на основі порівняльного аналізу існуючих мікроболометричних камер, областей їх застосування, основних технічних параметрів і характеристик та визначити метод підвищення просторової роздільної здатності камери для супутника.
2. Дослідити узагальнену математичну модель мікроболометричної камери космічного базування, яка враховує параметри фону, об'єкту, оптичної системи та ПВ.
3. Побудувати та дослідити математичну модель субпіксельної реєстрації зображень в МБК.
4. Дослідити вплив застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК.
5. Провести експериментальні дослідження процесу реєстрації субпіксельно зміщених зображень з метою підвищення просторової роздільної здатності камери.

*Об'єкт дослідження* - процес формування зображення в мікроболометричній камері космічного базування методом реєстрації та обробки субпіксельно зміщених зображень.

*Предмет дослідження* - методи підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень.

**Методи дослідження.** З метою розв'язання поставлених задач в роботі використовується математичне моделювання процесів перетворення сигналів ІЧ випромінювання від поверхні Землі до електричних сигналів з приймача випромінювання, математичні основи теорії оптико-електронних приладів, комп'ютерне моделювання оптико-електронних приладів, експериментальні дослідження характеристик камери.

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

1. Запропоновано новий метод субпіксельної реєстрації зображень для

підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту матричного приймача випромінювання відносно орбітального руху.

2. Вперше розроблена універсальна математична модель субпіксельної реєстрації зображень для забезпечення підвищення просторової роздільної здатності камери, яка дозволяє розрахувати набір параметрів для організації різних режимів субпіксельної реєстрації зображень з мінімальними похибками реєстрації.
3. Встановлено залежності просторової та енергетичної роздільної здатності камери від параметрів режиму субпіксельної реєстрації в різних спектральних діапазонах.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному.

1. Методика розрахунку характеристик мікроболометричної камери із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень дозволяє оцінювати ефективність роботи мікроболометричних камер та підвищення їх просторової та енергетичної роздільної здатності внаслідок застосування субпіксельної реєстрації зображень на етапі проектування.
2. Алгоритм розрахунку параметрів різних режимів зйомки із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень та розроблене програмне забезпечення на основі побудованої математичної моделі процесу субпіксельної реєстрації зображень дозволяє вибрати параметри режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для різних умов зйомки.

На запропонований метод субпіксельної реєстрації було отримано патент України на винахід. Отримані методика розрахунку основних характеристик мікроболометричної камери, алгоритм розрахунку параметрів різних режимів зйомки із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень, програмне забезпечення для вибору параметрів зйомки супутниковою мікроболометричною камерою з субпіксельною реєстрацією зображень використані на КП СПБ «Арсенал» при проектуванні та створенні дослідного зразка сканера дальнього інфрачервоного діапазону для космічного апарату «Січ-2М», що підтверджується відповідним актом впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, висновків та рекомендацій виконана автором самостійно.

У опублікованих у співавторстві роботах дисертанту належить наступне: аналіз та дослідження методів цифрової обробки інфрачервоних зображень з метою підвищення просторової роздільної здатності [3, 6, 8–10, 13, 14, 16]; дослідження математичної моделі мікроболометричної камери із врахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та ПВ із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень [4, 5, 1, 12, 17, 19]; розробка та дослідження математичної моделі субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності

мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту ПВ відносно орбітального руху камери [7, 2, 32, 11, 15, 18, 22, 23]; аналіз похибок реєстрації зображень, що виникають при використанні запропонованої технології, та причини їх виникнення; розробка програмного забезпечення для розрахунку параметрів режиму реєстрації для забезпечення мінімальних значень похибок при виборі режиму реєстрації відповідно до умов зйомки [25-27, 29]; визначення впливу процесу підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на узагальнені характеристики мікроболометричної камери; [20, 21, 24, 28, 30, 31]. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження обговорювалися на 18 науково-технічних конференціях: III - V науково-практичні конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 2010 – 2012 роки, м. Київ; XI, XIII, XIV Міжнародні науково-технічні конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 2012, 2014, 2015 роки, м. Київ; 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science «SPO», м. Київ, 2012 р.; XII, XVI Міжнародні науково-практичні конференції «Людина і космос» м. Дніпро, 2010, 2014 роки; 6-а Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Новые направления развития приборостроения», м. Мінськ, 2013 р.; XI Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013», м. Київ, 2013 р.; 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій - 2014», м. Київ; Tenth International Conference on Digital Technologies, м. Жиліна, Словачія, 2014 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Безпека в цивільному захисті», м. Київ, 2014; 14-та, 15-та та 16-та Українська конференція з космічних досліджень, м. Ужгород, 2014 р.; м. Одеса, 2015, 2016 років; Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування», м. Київ, КП СПБ «Арсенал», 2014 р.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 32 наукових праці, у тому числі 7 статей у фахових наукових виданнях (1 стаття – у виданні іноземної держави, 1 стаття – у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science), 1 патент України на винахід та 24 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та 7 додатків. Повний обсяг дисертації 238 сторінок, з обсягом основного тексту 173 сторінки. Дисертація містить 54 рисунки, 14 таблиць, список використаної літератури з 85 найменувань на 12 сторінках і 7 додатків на 53 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та зв'язок з науковими програмами.

В першому розділі на основі аналізу призначення космічних МБК виявлено, що область застосування даних ІЧ знімків ДЗЗ охоплює різні галузі народного господарства, наукових досліджень та військових справ. Розглянуто переваги та недоліки мікроболометричних приймачів випромінювання та обґрунтовано вибір приймача.

Системи обробки даних ДЗЗ фактично з'явилися як наслідок якісного розвитку програмних засобів, призначених для цифрової обробки зображень загального спрямування. Огляд методів цифрової обробки даних ДЗЗ показав, що для забезпечення розв'язання поставлених задач отримані знімки піддаються складній багаторівневій та багатоплановій цифровій обробці, яка є причиною висування жорстких вимог до зображень, та, відповідно, і до технічних параметрів камер.

Проаналізовано основні характеристики і параметри МБК у відповідності до групи камер. Визначено, що первинними та найважливішими параметрами ефективності інфрачервоних камер космічного базування, які використовуються виробниками для оцінювання роботи ІЧ камер, є просторова та енергетична роздільна здатність. Обґрунтовано вибір характеристик для оцінювання просторової та енергетичної роздільної здатності камери.

Порівняльний аналіз основних технічних параметрів і характеристик існуючих МБК показав, що роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для вирішення багатьох задач ДЗЗ, що свідчить про актуальність проблеми підвищення просторової роздільної здатності. Визначено необхідність дослідження математичної моделі МБК та її складових з метою виявлення шляхів підвищення просторової та енергетичної роздільної здатності.

Огляд існуючих методів підвищення роздільної здатності зображень виявив переваги застосування мікросканування – методу, який дозволяє додавати в результуюче зображення високої роздільної здатності більше корисної інформації. Наведено основні методи відновлення зображень з високою роздільною здатністю з використанням субпіксельно зміщених зображень нижчої роздільної здатності при субпіксельній обробці та наведено результати їх застосування.

В результаті аналізу стану проблеми обґрунтована мета дисертаційної роботи та сформульовані задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

Метою **другого розділу** дисертаційної роботи є дослідження узагальненої математичної моделі МБК з урахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання, електронного блоку

обробки і передачі сигналу. Розглянуто перетворення сигналів в МБК на основі узагальненої схеми системи «об'єкт – атмосфера – МБК».

Дослідження математичних моделей окремих складових системи «об'єкт – атмосфера – МБК» показало, що, в першу чергу, обмеження просторової роздільної здатності розглянутої камери спричинено використанням приймача, а саме розмірами його пікселів. Якщо вважати МБК лінійною інваріантною системою, то її модуляційна передавальна функція (МПФ) визначається добутком МПФ об'єктива  $M_o(v_x, v_y)$  і МПФ приймача випромінювання  $M_D(v_x, v_y)$ .

$$M_s(v_x, v_y) = M_o(v_x, v_y)M_D(v_x, v_y) \quad (1)$$

На рис. 1 наведено графіки МПФ складових системи, МПФ всієї системи та її апроксимація.

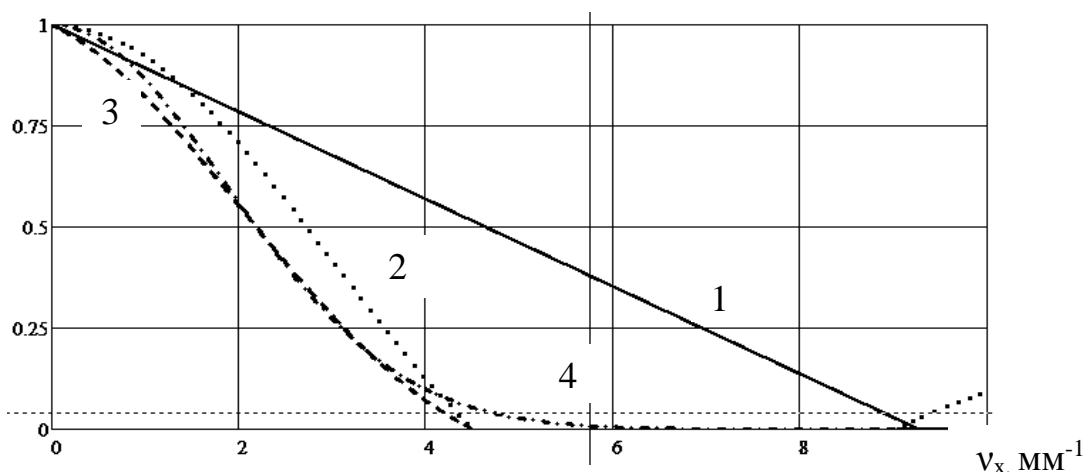


Рис. 1. Графіки залежності модуляційної передавальної функції від просторової частоти:

1 – об'єктива; 2 – ПВ; 3 – МБК; 4 – апроксимація МПФ камери

На основі математичної моделі МБК розраховано таку узагальнену характеристику як мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ)  $MRTD(v_x)$ , яка є критерієм просторової та енергетичної роздільної здатності МБК.

$$MRTD(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_0 f_f t_E}}$$

де  $SNR_r$  – відношення сигнал/шум в зображенні штрихової міри, яке забезпечує виявлення штрихів з заданою ймовірністю  $P_d$ ;  $NETD$  – еквівалентна шуму різниця температур МБК;  $v_x$  – просторова частота в мрад<sup>-1</sup>;  $M_s(v_x)$  – модуляційна передавальна функція МБК;  $\alpha_D, \beta_D$  – кутові розміри піксела в мілірадіанах,  $f_f$  – частота кадрів;  $t_E = 0,2$  с – постійна часу ока,  $t_0$  – час зчитування одного піксела,  $\Delta f$  – ефективна шумова смуга пропускання.



Отримані значення еквівалентної шуму різниці температур камери для температури земної поверхні 300 К лежать в діапазоні від 0,11 К (в панхроматичному спектральному каналі) до 0,84 К (в спектральному каналі 12,5 – 13,5 мкм). Показано, що розглянута МБК забезпечує виявлення об'єктів розміром 200 м на поверхні Землі (при висоті орбіти 668 км) з температурним контрастом від 0,3 К (панхроматичний спектральний канал) до 3 К (спектральний канал 12,5 – 13,5 мкм), що не є достатнім для вирішення задач ДЗЗ.

В результаті аналізу математичної моделі МБК виявлено наступні шляхи покращення характеристик МБК: використання світлосильних об'єктивів, більш чутливих ПВ, зменшення частоти кадрів приймача тощо. Використання мікроболометричної матриці з меншим розміром піксела також дозволить покращити просторову роздільну здатність МБК. Обґрунтовано покращення якості зображень МБК шляхом зменшення впливу геометричного шуму ПВ та шляхом застосування цифрових методів зменшення похибок дискретизації.

**Третій розділ** присвячено теоретичному дослідженню впливу процесу підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на ефективність аерокосмічної зйомки.

Запропоновано метод субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту матричного приймача випромінювання відносно орбітального руху без конструктивних ускладнень, який має значні переваги у порівнянні з існуючими методами отримання субпіксельно зміщених кадрів.

Задача підвищення просторової роздільної здатності супутникових зображень полягає в переході від піксельної сітки окремих зображень низької роздільної здатності, зміщених на певну частку піксела одне відносно одного, до єдиної субпіксельної сітки зображення високої роздільної здатності в межах спільного поля зору. Відношення кроку субпіксельної сітки зображення високої роздільної здатності до кроку піксельної сітки зображень низької роздільної здатності є коефіцієнтом підвищення лінійної роздільної здатності зображення (КЛПРЗ), який дорівнює кількості  $n$  використовуваних зображень із субпіксельними зміщеннями.

У випадку супутникової зйомки послідовність субпіксельно зміщених зображень можна одержати за рахунок власного послідовного руху платформи-носія. Для цього здійснюється поворот ПВ (або всієї камери) відносно напрямку польоту космічного апарату (КА) на кут, який забезпечує синхронне зміщення зображення не тільки вздовж стовпців, але і вздовж рядків ПВ. Обґрунтовано, що в загальному випадку при використанні  $n$  зміщених один відносно одного кадрів коефіцієнт зміщення вздовж проекції рядків (тобто субпіксельні зміщення проекцій кадрів в долях проекції піксела) ПВ складатиме  $k_{y'} = 1/n$  піксела, а вздовж проекції стовпців –

$k_{x'} = (z + \frac{k}{n})$  піксела, де  $z \geq 0$  – ціле число, яке визначає кількість «пропущених», тобто цілих рядків, які не беруть участі в утворенні субпіксельної сітки,  $k$  – ціле число,  $0 < k < n$ . Для створення рівномірної по осях субпіксельної сітки при парному значенні  $n$  значення  $k$  повинні бути непарними.

Отримано формулу, що описує залежність значення кута повороту ПВ відносно напрямку польоту носія апаратури  $\alpha_1$  від коефіцієнтів зміщення проєкцій кадрів.

$$\alpha_1 = \arctg \left( \frac{k_{y'}}{k_{x'}} \right) = \arctg \frac{1}{zn+k} \quad (2)$$

На рис. 2 представлені проєкції кадрів, отриманих в результаті запропонованого методу субпіксельної реєстрації, при наступних значеннях параметрів:  $n = 3, z = 1, k = 1$ . Символом  $P_3$  позначено проєкцію піксела на поверхні Землі,  $V$  – напрямок польоту супутника.

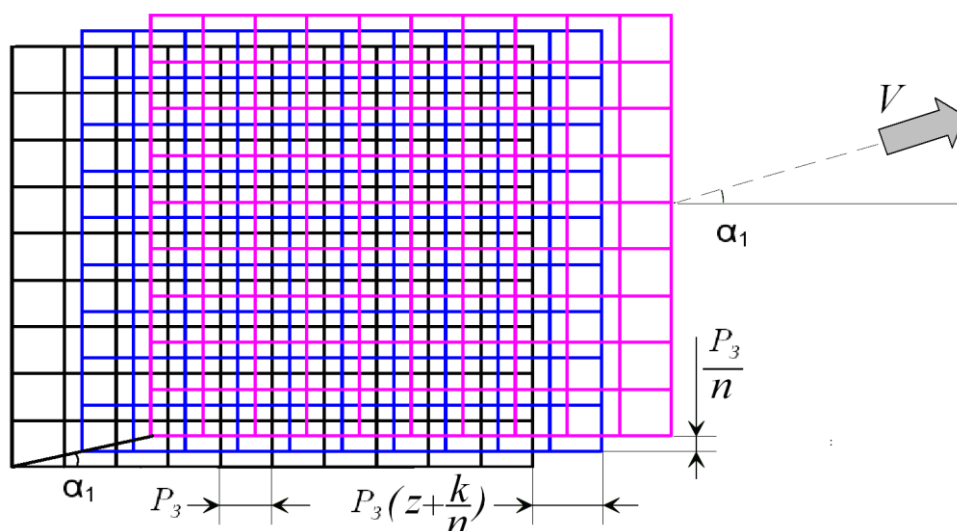


Рис. 2. Проєкції на поверхні Землі кадрів, отриманих в результаті субпіксельної реєстрації за рахунок власного руху космічного апарату та повороту ПВ

Крім руху КА на переміщення підсупутникової точки впливає обертання Землі. Ступінь впливу обертання Землі залежить від широти місцевості, що знімається, і ділянки орбіти, яка може бути низхідною або висхідною. Обертання Землі на низхідній ділянці орбіти переміщує фіксовану точку на поверхні Землі вліво, при цьому підсупутникова точка зміщується вправо на поверхні Землі. Тому при нахилі ПВ проти годинникової стрілки додатковий поворот для врахування обертання Землі буде зменшувати кут  $\alpha_1$ , а при нахилі ПВ за годинниковою стрілкою – збільшувати його. Збільшення кута  $\alpha_1$  призводить до зменшення ширини смуги зйомки. В результаті дослідження впливу обертання Землі на застосування субпіксельної реєстрації зображень розроблено математичну модель субпіксельної реєстрації зображень для забезпечення підвищення

просторової роздільної здатності камери. Встановлено залежність, яка дозволяє пов'язати параметри зйомки та параметри МБК:

$$\sin(\xi) = \frac{\left(z + \frac{k}{n}\right) \cdot a \cdot H \cdot 10^3}{\tau \cdot n \cdot F' \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i)\right)}, \quad (3)$$

де  $\xi$  - кут повороту ПВ, необхідний для реалізації субпіксельної реєстрації зображень з урахуванням обертання Землі;  $a$  - розмір пікселя ПВ, мкм;  $H$  - висота орбіти, м;  $\tau$  - час формування кадру, с;  $F'$  - фокусна відстань об'єктива МБК, мм;  $R_3 = 6371$  км - радіус Землі;  $\mu_0 = 398602$  км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> - гравітаційний параметр Землі;  $\omega_3 = 15''/с$  - кутова швидкість обертання Землі;  $i$  - кут нахилу орбіти супутника. При математичному моделюванні у зв'язку з великим радіусом Землі для спрощення розрахунків кривизна поверхні Землі не враховувалась.

Швидкість додаткового зміщення підсупутникової точки за рахунок обертання Землі залежить від широти місцевості, що знімається. Отримана формула дозволяє розрахувати уточнений кут повороту приймача випромінювання для забезпечення субпіксельної реєстрації зображень з заданими параметрами на низхідній ділянці орбіти з урахуванням широти  $B$  місцевості, що знімається.

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{k_X \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i)\right) + k_Y \cdot R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B}}{-k_Y \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i)\right) + k_X \cdot R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B}} \quad (4)$$

Формулу (4) покладено в основу методики розрахунку основних параметрів режиму субпіксельної реєстрації зображень. Розроблена методика дозволила створити універсальний алгоритм розрахунку параметрів режиму субпіксельної реєстрації для зйомки місцевості на різній широті, який втілено в програмному забезпеченні.

За допомогою розробленого програмного забезпечення проаналізовано велику кількість режимів субпіксельної реєстрації та обрано параметри такого режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для заданих умов зйомки.

Критерієм вибору параметрів зйомки обрано значення, які характеризують рівномірність створеної субпіксельної сітки:

- відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків матричного ПВ від ідеальних (в розглянутому випадку для  $n = 2$  дорівнюють 0,5);
- відхилення коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків матричного ПВ в залежності від широти місцевості, що знімається;
- відхилення коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків матричного ПВ в залежності від зміни висоти орбіти в діапазоні  $(H_{\text{ном}} \pm 20)$  км.

Найбільші значення похибок відповідають граничним значенням висоти польоту  $(H_{\text{ном}} \pm 20)$  км і найбільшим значенням коефіцієнту зміщення вздовж проекції стовпців ПВ. Наприклад, для висоти польоту  $H_{\text{ном}} = 668$  км за рахунок похибок, пов'язаних із відхиленням реальної висоти орбіти, коефіцієнт зміщення вздовж проекції стовпців МПВ може досягати 0,7 замість 0,5.

В результаті аналізу обрано значення параметрів субпіксельної реєстрації зображень при роботі на низхідній ділянці орбіти і повороті ПВ за годинниковою стрілкою і номінальній висоті орбіти 668 км:

- кут повороту ПВ відносно напрямку руху КА  $\xi_{\text{об6}} \approx 14,35^\circ$  (при частоті кадрів ПВ - 60 Гц) або  $\xi_{\text{об9}} \approx 9,38^\circ$  (при частоті кадрів ПВ - 30 Гц);
- коефіцієнт зміщення проекцій кадрів вздовж проекцій стовпців матриці -  $k_x = 2,5$  (при частоті кадрів ПВ - 60 Гц) або 4,5 (при частоті кадрів ПВ - 30 Гц);
- кількість кадрів, які не використовуються при обробці, в обох випадках дорівнюватиме 2.

Обрані варіанти дозволяють забезпечити виконання субпіксельної реєстрації зображень з мінімальними похибками реєстрації та несуттєвим зменшенням смуги захвату при роботі ПВ на частоті кадрів 30 Гц та 60 Гц.

Наведено математичну модель субпіксельної обробки зображень в мікроболометричній камері. Досліджено вплив субпіксельної реєстрації зображень з наступною субпіксельною обробкою на енергетичну роздільну здатність камери. Математична модель камери (1) з урахуванням цього впливу представлена формулою

$$M_{SSR}(v_x, v_y, \varphi, \Delta Y) = M_O(v_x, v_y) M_{DSSR}(v_x, v_y) M_\Phi(v_x, v_y, \varphi) M_{СДВ}(v_y, \Delta Y) \quad (5)$$

де  $M_O(v_x)$  - МПФ об'єктива камери;  $M_{DSSR}(v_x)$  - просторова МПФ ПВ з розміром елемента, рівним розміру еквівалентного субпіксела розміром  $V_{DSSR}$  - умовної частини піксела, значення сигналу від якого визначається в результаті субпіксельної обробки;  $M_\Phi(v_x, v_y, \varphi)$  - складова МПФ, пов'язана з поворотом ПВ на кут  $\varphi$  для забезпечення субпіксельної реєстрації зображень;

$M_{сдв}(v_y, \Delta Y)$  - МПФ зсуву підсупутникової точки за час формування одного елемента за рахунок безперервного руху КА. Просторова МПФ приймача в одномірному випадку описується функцією

$$M_{DSR}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_{DSR} v_x)}{\pi V_{DSR} v_x}$$

де розмір еквівалентного субпікселя визначається як

$$V_{DSR} = \frac{V_D}{k_{ISR}}$$

На основі математичної моделі (5) та формули, що дозволяє отримати значення МРРТ сучасних МБК без врахування особливостей зорової системи оператора, отримано вираз для розрахунку МРРТ з урахуванням впливу субпіксельної реєстрації зображень

$$MRTD(v_x) = \frac{\pi}{4\tau_o \cdot \tau_a \cdot K_{\Delta\lambda}} SNR_r \frac{NETD}{M_O(v_x) M_{DSR}(v_x)} \quad (6)$$

Отримані за формулою (6) залежності МРРТ для різних значень коефіцієнта підвищення лінійної роздільної здатності (КПЛРЗ) субпіксельної реєстрації зображень (який дорівнює параметру субпіксельної реєстрації  $n$ ) для панхроматичного спектрального діапазону представлені на рис. 3.

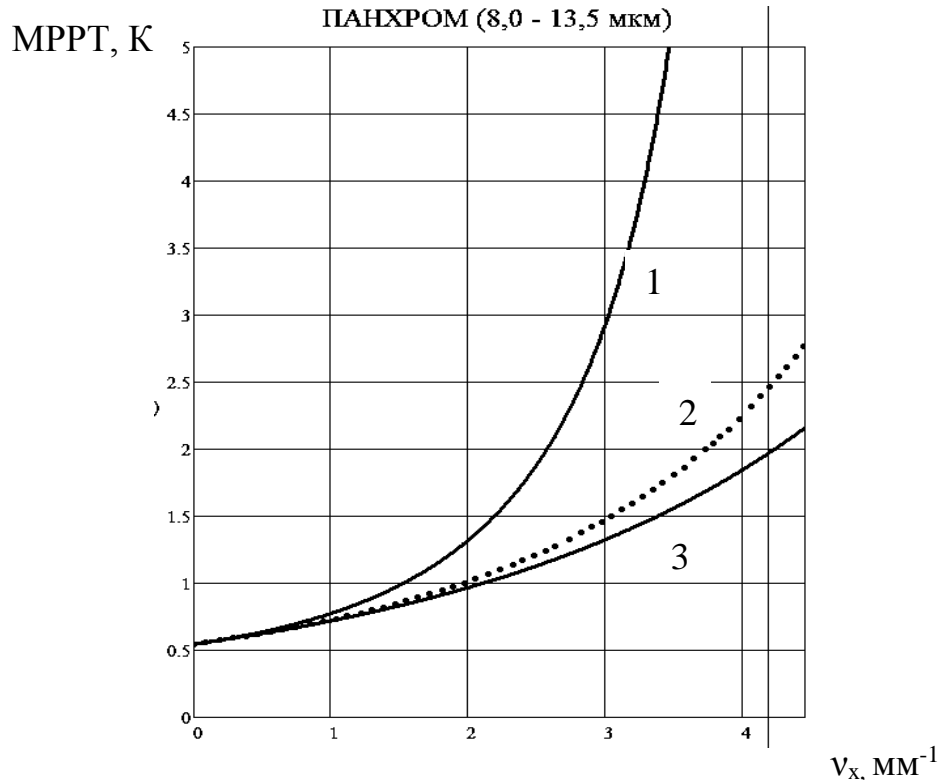


Рис. 3. Графік залежності мінімальної роздільної різниці температур  $MRTD(v_x)$  МБК від просторової частоти в робочому спектральному діапазоні (8,0 - 13,5) мкм для наступних значень КПЛРЗ: 1 - для  $k_{ISR} = 1$  (без субпіксельної обробки); 2 - для  $k_{ISR} = 2$ ; 3 - для  $k_{ISR} = 3$

Показано, що субпіксельна обробка з КЛПРЗ  $k_{ISR} = 2$  дозволяє суттєво покращити характеристику МРРТ. При цьому вплив субпіксельної обробки на МРРТ збільшується зі збільшенням просторової частоти. При розділенні великих мір застосування субпіксельної обробки майже не здійснює впливу на значення МРРТ. При цьому застосування субпіксельної реєстрації з  $k_{ISR} = 3$  надає незначне покращення за рахунок обмеження МПФ об'єктива.

Підвищення лінійної роздільної здатності МБК більше ніж у два рази за рахунок субпіксельної реєстрації зображень, не є доцільним, оскільки роздільна здатність об'єктива є недостатньою і не дозволяє розділити отримані приймачем просторові частоти. Також були отримані залежності МРРТ для робочих спектральних діапазонів МБК, аналіз яких дозволив обґрунтувати вибір параметру субпіксельної реєстрації КЛПРЗ  $k_{ISR} = 2$ , що відповідає очікуваному зростанню роздільної здатності в  $\sqrt{k_{ISR}} = 1,41$  рази.

Метою **четвертого розділу** є експериментальне дослідження впливу процесу підвищення просторової роздільної здатності камери за рахунок реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на ефективність аерокосмічної зйомки. Експериментальні дослідження проводилися шляхом вимірювання МРРТ та мінімальної виявлювальної різниці температур (МВРТ) камери без застосування та при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень.

Розроблено стендове обладнання, блок-схема якого представлена на рис. 4.

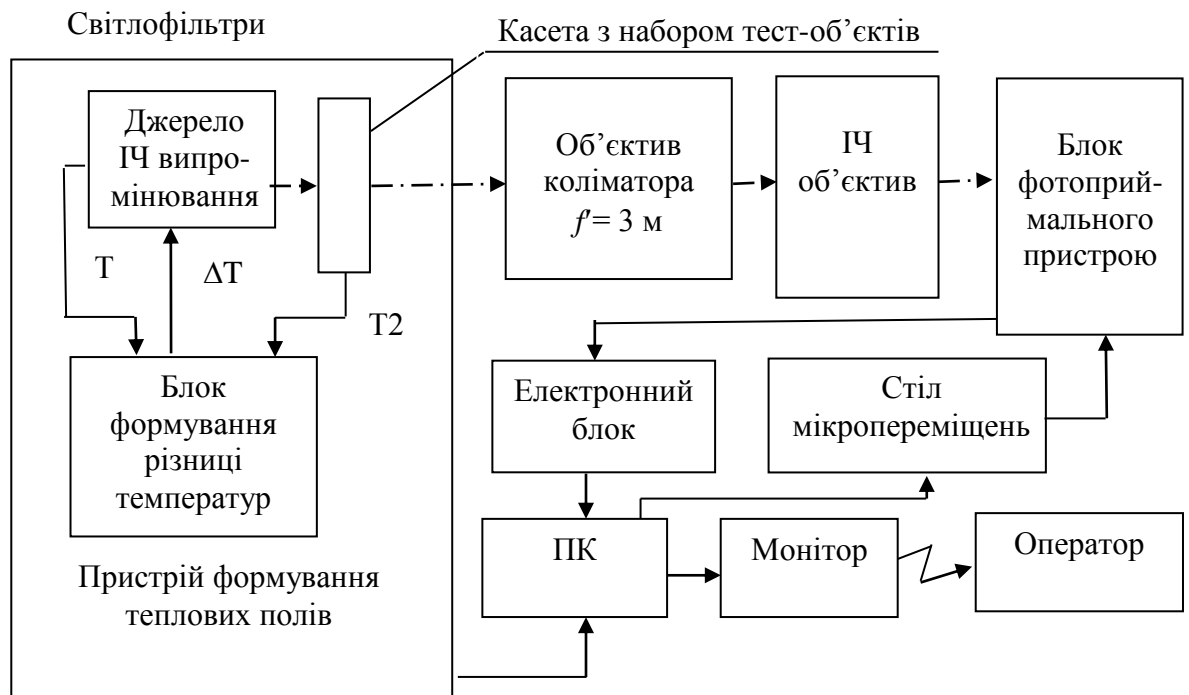


Рис. 4. Блок-схема стенду вимірювання характеристик ІЧ-камери

Принцип роботи стенда полягає в формуванні зображення тест-об'єкта в площині аналізу - фоточутливій площині ПВ. В якості тест-об'єкта для вимірювання МРРТ застосовують міри Фуко, які мають чорну поверхню, що випромінює з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього середовища. Безпосередньо за мірою розташовано фоновий випромінювач у вигляді пластини з міді з чорною поверхнею, що випромінює з температурою, яка може змінюватися за допомогою чотирьох елементів Пельтьє в більшу або меншу сторону відносно температури навколишнього середовища. 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.

Розроблена методика отримання кадрів для експериментальних досліджень підвищення просторової роздільної здатності камери дозволила отримати МВРТ та МРРТ МБК із реєстрацією зображень із субпіксельними зміщеннями та визначити вплив застосування субпіксельної реєстрації на характеристики камери. Для отримання кадрів із субпіксельним зміщенням для наступної програмної обробки використовувався прецизійний трьохкоординатний столик з фотоприймальним пристроєм. Методика, що передбачала субпіксельні зміщення приймача на  $\Delta X_1 = \Delta Y_1 = 0,48a$  та на  $\Delta X_2 = \Delta Y_2 = 0,6a$ , дозволила перевірити стійкість алгоритму обробки до похибок зміщення. Виявлено, що відхилення субпіксельних зміщень від номінального значення  $0,5a$  не впливає на результат вимірювань МРРТ та МВРТ за умови, що ці відхилення відомі.

Експериментальні дослідження МВРТ камери показали, що застосування субпіксельної реєстрації зображень призводить до незначного підвищення просторової роздільної здатності МБК на низьких просторових частотах. Виявлено, що МВРТ не може слугувати критерієм просторової роздільної здатності МБК з субпіксельною реєстрацією зображень.

Отримані результати МРРТ за аналізом зображень мір з різною просторовою частотою, теоретичні значення МРРТ за формулою (5) без субпіксельної обробки та апроксимовані значення МРРТ за результатами аналізу зображень після субпіксельної обробки наведені на рис. 5. Експериментально отримані значення МРРТ підтвердили розраховані за допомогою математичної моделі значення.

За результатами експериментального вимірювання МРРТ побудовані залежності підвищення просторової роздільної здатності при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень від температурного контрасту (рис. 6) та зменшення значень МРРТ при субпіксельній реєстрації зображень від просторової частоти (рис. 7) для оцінки впливу застосування субпіксельної реєстрації на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК.

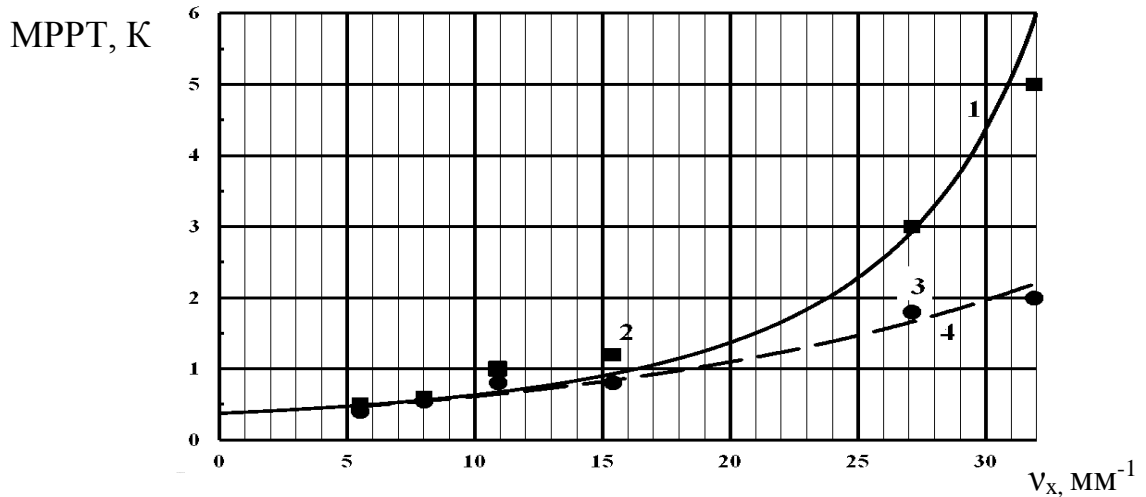


Рис.5. Графіки залежності  $MRTD (v_x)$  МБК:  
 1 – без субпіксельної реєстрації (теоретичні значення); 2 – без субпіксельної реєстрації (експериментальні значення); 3 – із субпіксельною реєстрацією (експериментальні значення); 4 – із субпіксельною реєстрацією (теоретичні значення)

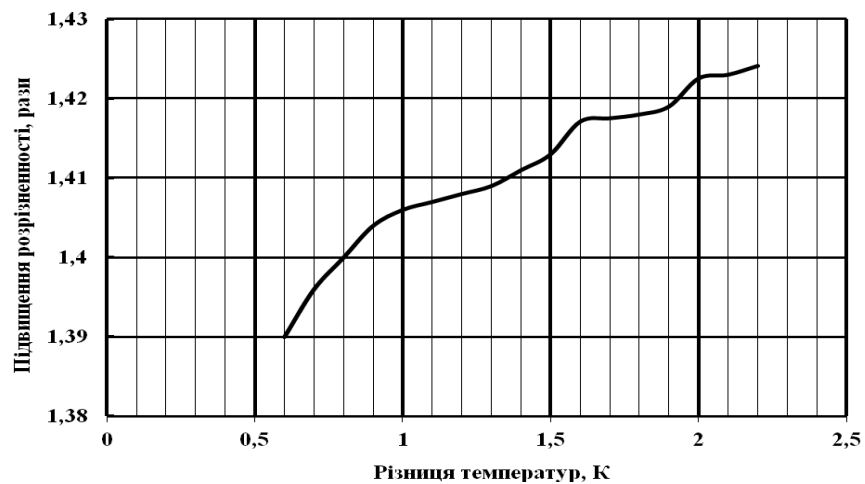


Рис. 6. Підвищення просторової роздільної здатності при субпіксельній реєстрації в залежності від температурного контрасту

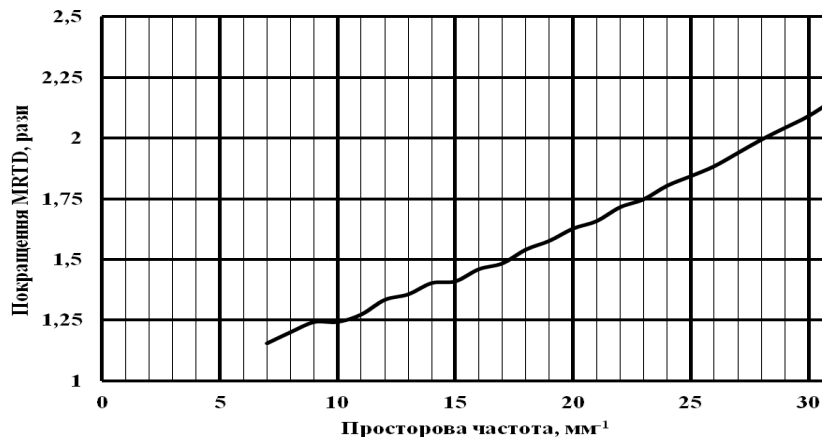


Рис. 7. Покращення МРРТ при субпіксельній реєстрації в залежності від просторової частоти (за результатами експериментів)



Середнє значення підвищення просторової роздільної здатності при субпіксельній обробці склало 1,41 рази, що підтвердило отримане внаслідок теоретичних досліджень значення. Відповідно до рис. 7 покращення енергетичної роздільної здатності в діапазоні робочих просторових частот досягає двох.

Результати експериментально та теоретично отриманих значень МРРТ в спектральних діапазонах в області низьких просторових частот представлені на рис. 8. Експериментальні дослідження МРРТ камери в робочих спектральних діапазонах показали, що на низьких просторових частотах відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази, проте це підвищення є несуттєвим. Значне підвищення просторової та енергетичної роздільної здатності при застосуванні реєстрації зображень із субпіксельними зміщеннями відбувається на високих просторових частотах, які відповідають дрібним деталям зображення.

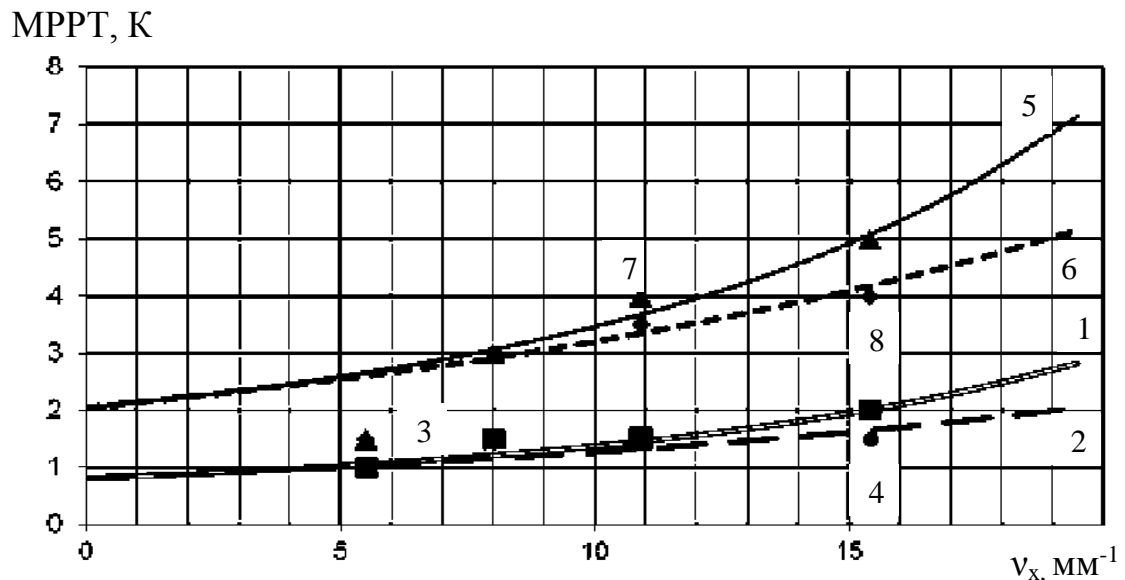


Рис. 8. Експериментальні та теоретичні залежності МРРТ МБК

від просторової частоти в спектральних діапазонах:

- 1 – без субпіксельної реєстрації (теоретичні значення, 8 – 13 мкм);
- 2 – із субпіксельною реєстрацією (теоретичні значення, 8 – 13 мкм);
- 3 – без субпіксельної реєстрації (експериментальні значення, 8 – 13 мкм);
- 4 – із субпіксельною реєстрацією (експериментальні значення, 8 – 13 мкм);
- 5 – без субпіксельної реєстрації (теоретичні значення, 8 – 10 мкм);
- 6 – із субпіксельною реєстрацією (теоретичні значення, 8 – 10 мкм);
- 7 – без субпіксельної реєстрації (експериментальні значення, 8 – 10 мкм);
- 8 – із субпіксельною реєстрацією (експериментальні значення, 8 – 10 мкм).

При висоті орбіти 668 км крок точок зображення на поверхні Землі складає 148,1 м. Відповідно до проведених експериментальних досліджень за рахунок субпіксельної реєстрації зображень і наступної їх обробки забезпечується просторова роздільна здатність МБК не гірше за 105 м.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова задача підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених зображень за рахунок власного руху носія знімальної апаратури.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

1. Порівняльний аналіз технічних характеристик існуючих МБК виявив, що роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для рішення багатьох задач ДЗЗ, тому проблема підвищення просторової роздільної здатності камер є актуальною.
2. Дослідження удосконаленої узагальненої математичної моделі МБК з урахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання показало, що розглянута камера забезпечує виявлення об'єктів розміром 200 м на поверхні Землі (при висоті орбіти 668 км) з температурним контрастом від 0,3 К (панхроматичний спектральний канал) до 3 К (спектральний канал 12,5 – 13,5 мкм). Тобто просторова роздільна здатність не є достатньою для вирішення задач ДЗЗ.
3. Побудовано математичну модель процесу субпіксельної реєстрації зображень в МБК, що дозволяє врахувати параметри зйомки та параметри камери. На основі побудованої математичної моделі розроблено метод розрахунку основних параметрів режиму субпіксельної реєстрації зображень. Дослідження впливу обертання Землі на застосування субпіксельної реєстрації зображень дозволило розробити універсальний алгоритм розрахунку параметрів режиму субпіксельної реєстрації для зйомки місцевості на різній широті, який було втілено в розробленому програмному забезпеченні. За допомогою розробленого програмного забезпечення проаналізовано велику кількість режимів субпіксельної реєстрації та вибрано параметри такого режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для заданих умов зйомки.
4. В результаті дослідження впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність встановлено залежності просторової та енергетичної роздільної здатності камери від параметрів режиму субпіксельної реєстрації в різних спектральних діапазонах. Виявлено, що застосування субпіксельної реєстрації зображень покращує роздільну здатність в середньому в 1.4 рази, при цьому на високих просторових частотах очікується більш суттєве підвищення.
5. Результати експериментальних досліджень підтверджують підвищення просторової роздільної здатності камери за рахунок реєстрації і обробки субпіксельно зміщених зображень. Відбувається підвищення роздільної

здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази. При висоті орбіти 668 км для обраних параметрів камери крок точок зображення на поверхні Землі дорівнює 148 м. За рахунок субпіксельної реєстрації зображень і наступної їх обробки забезпечується підвищення просторової роздільної здатності щонайменше на 33% (відповідає кроку точок зображення на поверхні Землі не більше за 105 м).

6. Отримані результати було впроваджено на КП СПБ «Арсенал» при проектуванні та створенні дослідного зразка сканера дальнього інфрачервоного діапазону для космічного апарату «Січ-2М».

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Колобродов В.Г. Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико-електронних приладах / В.Г. Колобродов, К.В. Харитоненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип.40, с. 23-31.

*Здобувачем проведено аналіз існуючих методів цифрової обробки зображень, запропоновано декілька шляхів спрощення розрахунків для обробки в масштабі реального часу.*

2. Даниленко А.Н. Обобщенные характеристики инфракрасных систем поиска и слежения с матричными приемниками излучения / А.Н. Даниленко, В.Г. Колобродов, Е.В. Харитоненко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №3, с.5-19.

*Здобувачем проаналізовано основні характеристики інфрачервоних систем та запропоновано методуку їх розрахунку.*

3. Добровольська К.В. Математичне моделювання тепловізійного приладу спостереження з мікроболометричною матрицею / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І Лихоліт, В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2014. – Вип.48(2), с. 28-38.

*Здобувачем представлено шлях покращення характеристик тепловізійної камери з мікроболометричною матрицею.*

4. Колобродов В.Г. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с матричными приемниками излучения / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Озброєння і військова техніка. – 2014. – №3. – с. 56-62.

*Здобувачем розроблено методуку підвищення просторової роздільної здатності тепловізійної камери з матричним приймачем випромінювання на основі аналізу існуючих методів.*

5. Lyalko V.I. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich S.A., S.V. Shklyar, V.N. Podorvan, N.I. Likholit, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol.12. – No.2. – p. 153-164. (іноземне видання)

*Здобувачем розроблено математичну модель технології підвищення просторової роздільної здатності та аналіз результатів експериментального дослідження технології підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери.*

6. Лялько В.И. Физическая модель инфракрасного спектрометра с повышением пространственного разрешения при помощи субпиксельной обработки изображений / В.И. Лялько, М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Добровольская // Наука та інновації. – 2015. – 11(6). – с. 16-28.

<http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.016>, ISSN 1815-2066

*Здобувачем розраховано параметри для реалізації підвищення просторової роздільної здатності інфрачервоного спектрометра.*

7. Kolobrodov V.G Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko, V. M. Tiagur, K. V. Dobrovolska // Visnyk NTUU "KPI". Seria Radiotekhnika. Radioapparaturbuduvannia. – 2017. – №69. – р. 30-34. (входить до наукометричної бази Web of Science)

*Здобувачем розрахована просторове розділення мікроболометричної камери при заданих кутах візування.*

8. Пат. 109181 Україна МКВ G01C 3/08. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпиксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення / Лихоліт М.И., Лялько В.И., Попов М.О., Станкевич С.А., Тягур В.М., Харитоненко К.В. – Опубл. в Б.І., 2015, №14. – 15 с.

*Здобувачем розроблено математичну модель технології підвищення просторової роздільної здатності камери за рахунок власного руху супутника.*

9. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення з метою виявлення точкового об'єкта / К.В. Харитоненко // III науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування»: збірник тез доповідей, 27 – 29 квітня 2010 р., м. Київ. – Київ, 2010. – с. 92.

*Здобувачем запропоновано метод цифрової обробки тепловізійного зображення з метою виявлення точкового об'єкта на ньому.*

10. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення при дистанційному моніторингу землі / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // XII Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос»: збірник тез, 7 - 9 квітня 2010 р. – Дніпропетровськ, 2010. – с. 525.

*Здобувачем представлено методику цифрової обробки тепловізійного зображення для розв'язання задач дистанційного зондування Землі*

11. Харитоненко К.В. Цифрова обробка зображень з метою оцінювання швидкості руху об'єкта в тепловізійних приладах з матричними приймачами випромінювання / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у

майбутнє приладобудування» : збірник тез доповідей, 12 квітня 2011 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2011. – с. 84.

*Здобувачем представлено методику цифрової обробки серії зображень з метою оцінювання швидкості руху об’єкту в тепловізійних приладах з матричними приймачами випромінювання.*

12. Колобродов В.Г. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // XI науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – с.53-54.

*Здобувачем представлено метод субпіксельної обробки інфрачервоних космічних зображень.*

13. Колобродов В.Г. Математична модель сканера дальнього інфрачервоного діапазону / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // V науково-практична конференція “Погляд у майбутнє приладобудування” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – с.78.

*Здобувачем розглянуто математичну модель сканера дальнього інфрачервоного діапазону.*

14. Kharitonenko E.V. Image Resolution Enhancement in IR Device With Focal Plane Array / E.V. Kharitonenko, V.G. Kolobrodov, N.I. Lykholit, V.M. Tiagur // 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science : Scientific Works, 25-28 October 2012. – Kyiv, Ukraine. – p. 168.

*Здобувачем здійснено огляд та аналіз методів підвищення роздільної здатності інфрачервоної камери з матричним приймачем випромінювання.*

15. Лихолит Н.И. 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 Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013» Том 4, 21-23 травня 2013 р. – Київ, 2013. – с. 27.52-27.56.

*Здобувачем досліджено методи підвищення роздільної здатності інфрачервоних зображень в галузі дистанційного зондування Землі.*

16. Лихолит Н.И. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції “Авіа-2013”, Том 4, 21-23 травня 2013 р.– Київ, 2013. – с. 27.41-27.44.

*Здобувачем здійснено розрахунок параметрів зйомки з субпіксельними зміщеннями для підвищення просторової роздільної здатності інфрачервоної камери.*

17. Харитоненко Е.В. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с микроболометрическими

приемниками излучения для дистанционного зондирования Земли / Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Материалы 6-ой Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ, 2013, с. 212.

*Здобувачем представлено методи підвищення просторової роздільної здатності тепловізійних камер з мікроболометричними приймачами випромінювання.*

18. Добровольська К.В. Експериментальні дослідження мінімальної роздільної різниці температур тепловізійної камери із субпіксельною обробкою зображень / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.

*Здобувачем здійснено обробку та аналіз результатів експериментальних досліджень мінімальної роздільної різниці температур тепловізійної камери із субпіксельною обробкою зображень.*

19. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності дистанційної зйомки / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, М.О. Попов, С.А. Станкевич // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.

*Здобувачем розроблено програмне забезпечення та розраховані параметри реалізації субпіксельної реєстрації зображень при дистанційній зйомці.*

20. Добровольская Е.В. Основные характеристики ИК камер для решения задач ДЗЗ / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур // XIII науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – с. 47.

*Здобувачем представлено нову методику розрахунку основних характеристик інфрачервоних камер.*

21. Добровольская Е.В. Оценка качества восстановленного изображения, полученного в результате субпиксельной обработки / Е.В. Добровольская // XIII науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – с. 48.

*Здобувачем здійснено оцінку якості відновленого зображення, що було отримано внаслідок субпіксельної обробки.*

22. Попов М.А. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Е.В. Добровольская, Н.С. Лубский // Матеріали 8-ої міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми телекомунікацій-2014” (ПТ-2014). – Київ: ІТС НТУУ “КПІ”, 2014.– С.57-60.

*Здобувачем здійснено розрахунок ступеня підвищення просторової роздільної здатності шляхом субпіксельної обробки зображень.*

23. Lyalko V.I. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, N.I. Likholt, V.M. Tyagur, C.V. Dobrovolska // Proceedings of the Tenth International Conference on Digital Technologies (DT'2014). – Žilina: University of Žilina, 2014. – p. 232-235.

*Здобувачем удосконалено математичну модель технології підвищення просторової роздільної здатності інфрачервоної камери.*

24. Popov M.A. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / M.A. Popov, V.M. Tyagur, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, C.V. Dobrovolska // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – с.72.

*Здобувачем здійснено розрахунок параметрів для оцінки відновленого інфрачервоного зображення в спектральних діапазонах радіометра.*

25. Добровольська К.В. Математична модель тепловізійної камери космічного базування із субпіксельною реєстрацією зображень» / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – с.74.

*Здобувачем проаналізовано вплив субпіксельної обробки зображень на математичну модель тепловізійної камери.*

26. Харитоненко К.В. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності» / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека в цивільному захисті». – Київ, 2014.

*Здобувачем розраховано похибки, пов'язані зі зміною широти місцевості, що знімається, та їх вплив на параметри субпіксельної реєстрації зображень.*

27. Лялько В.І. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості / В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Добровольська // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – с. 33-35.

*Здобувачем проаналізовано джерела похибок субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової розрізненості.*

28. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – с. 47-50.

*Здобувачем представлено шляхи зменшення похибок, що виникають при реалізації субпіксельної реєстрації зображень інфрачервоної камери.*

29. Добровольская Е.В. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» : збірник тез доповідей, 22-23 квітня 2015 р. – Київ: ПФ НТУУ “КПІ”. – 2015. – С. 69-70.

*Здобувачем досліджено вплив параметрів микроболометричних матриць на характеристики інфрачервоних камер.*

30. Stankevich S.A. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / S.A. Stankevich, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska, N.S. Lubsky // 15-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 24-28 серпня 2015 р. – Київ, 2015. – с. 212.

*Здобувачем враховано вплив обертання Землі на низхідній та висхідній ділянках орбіти в математичній моделі технології субпіксельної реєстрації зображень.*

31. Добровольская Е.В. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – с. 195.

*Здобувачем досліджено вплив повороту приймача випромінювання на модуляційну передавальну функцію микроболометричної матриці.*

32. Лялько В.И. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.И. Лялько, Н.И. Лихолит, М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, К.В. Добровольская // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – с. 225.

*Здобувачем здійснено оцінку якості зображень підвищеної просторової розрізненості.*

## АНОТАЦІЯ

*Добровольська К.В. Підвищення просторової роздільної здатності микроболометричної камери для супутника. – На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 – оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової задачі підвищення просторової роздільної здатності микроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених зображень за рахунок власного руху носія



знімальної апаратури. Досліджено математичну модель МБК, визначено критерії просторової та енергетичної роздільної здатності камери. Запроновано метод субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності. Розроблено математичну модель процесу реєстрації, методика розрахунку параметрів режиму реєстрації. За допомогою створеного програмного забезпечення проаналізовано параметри режимів субпіксельної реєстрації та обрано найбільш ефективний за даних умов зйомки. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження впливу процесу реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК.

**Ключові слова:** мікроболометрична камера, просторова роздільна здатність, енергетична роздільна здатність, субпіксельна реєстрація зображень, мінімальна роздільна різниця температур.

### АННОТАЦИЯ

*Добровольская Е.В.* Повышение пространственной разрешающей способности микроболометрической камеры для спутника. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – оптические приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению научной задачи повышения пространственной разрешающей способности микроболометрической камеры (МБК) для спутника.

Определены первичные и наиболее важные параметры эффективности инфракрасных камер космического базирования, а именно пространственная и энергетическая разрешающая способность. Показана необходимость повышения пространственной разрешающей способности камеры на основании сравнительного анализа существующих МБК, областей их применения, основных технических параметров и характеристик.

Исследована математическая модель МБК с учетом параметров объекта наблюдения, оптической системы и приемника излучения, на основании которой рассчитаны основные характеристики МБК для оценки пространственной и энергетической разрешающей способности. Определены основные пути повышения характеристик.

В рамках теоретического исследования влияния повышения пространственной разрешающей способности камеры предложен метод субпиксельной регистрации изображений за счет собственного движения спутника и поворота матричного приемника излучения относительно направления орбитального движения. Разработана универсальная математическая модель субпиксельной регистрации изображений, которая позволяет оценивать эффективность работы МБК и повышение

пространственной разрешающей способности на этапе проектирования. На основании разработанной математической модели процесса субпиксельной регистрации изображений создана методика расчета параметров режимов субпиксельной регистрации. Разработаны алгоритм и программное обеспечение, позволяющие проанализировать большое количество режимов субпиксельной регистрации изображений и выбрать параметры режима с минимальными значениями погрешностей регистрации для различных условий съемки. Определено влияние процесса субпиксельной регистрации изображений на пространственную и энергетическую разрешающую способность МБК.

Осуществлены экспериментальные исследования повышения пространственной разрешающей способности путем применения субпиксельной регистрации изображений. Приведены результаты измерений минимальной разрешаемой разности температур, которые подтвердили результаты теоретических исследований влияния субпиксельной регистрации изображений. Определено повышение пространственной разрешающей способности на ожидаемом в результате математического моделирования уровне, а именно в 1.4 раза. Рассчитаны соответствующие значения шага точек изображений на поверхности Земли при использовании и без использования субпиксельной регистрации изображений.

Ключевые слова: микроболометрическая камера, пространственная разрешающая способность, энергетическая разрешающая способность, субпиксельная регистрация изображений, минимальная разрешаемая разность температур.

## ANNOTATION

*Dobrovolska C.V. Spatial resolution enhancement of microbolometer satellite camera. – Manuscript copyright.*

A thesis for a degree of the Doctor of Philosophy in the Faculty of Instrumentation Engineering by specialty 05.11.07 – optical devices and systems. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to solving of a scientific problem of microbolometer satellite camera spatial resolution enhancement without placing of additional units into the device by processing obtained with subpixel displacements images due to its own motion of the satellite. Mathematical model of microbolometer camera is examined, spatial and energy resolution criteria are determined. Subpixel image registration method for camera’s spatial resolution enhancement is proposed. Mathematical model of subpixel image registration, mode parameters calculation technique are developed. Mode parameters of subpixel registration are analyzed by created software and the most effective mode for shooting conditions is chosen. Theoretical and experimental research of impact of subpixel image registration to camera’s spatial and energy resolution is provided.

**Key words:** microbolometer camera, spatial resolution, energy resolution, subpixel image registration, minimum resolvable temperature difference.