Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

Фабіровський Сергій Євгенович

УДК 528.831.1

ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СЕНСОРІВ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ З СУБПІКСЕЛЬНОЮ ОБРОБКОЮ ЗОБРАЖЕНЬ

05.12.13 – *радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій*

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
заслужений працівник освіти України,
доктор технічних наук, професор
Прудиус Іван Никифорович

Ідентичність усіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:
Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.10

/Демидов І. В./

Львів - 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……... 5
ВСТУП……. 6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СКАНЕРІВ СИСТЕМ ДЗЗ ТА МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕНЬ……... 15
1.1. Аналіз вимог до сканерів систем ДЗЗ космічного базування….. 15
1.2. Оцінка роздільної здатності елементів зображення в сканерах ДЗЗ видимого діапазону…..…….. 22
1.2.1. Функція розсіювання точки…… 28
1.2.2. Контрасно-частотна характеристика……. 29
1.2.3. Оцінка параметрів фотоприймача ЧЗН та його вибір для сканера високої роздільної здатності……. 31
1.2.4. Аналіз перспективності застосування CCD8091 у сканерах з високою роздільною здатністю…… 37
1.2.5. Розрахунок часових параметрів сканера з використанням фотоперетворювача CCD8091…….. 39
1.2.6. Світло-енергетичний розрахунок сканера з ФП ЧЗН типу CCD8091…… 40
1.3. Шляхи підвищення роздільної здатності зображень…… 47
Висновки до розділу 1…….…… 49
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ТА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЗОБРАЖЕНЬ, ПОБУДОВАНИХ СКАНЕРОМ СИСТЕМ ДЗЗ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ…….. 52
2.1. Основні фактори впливу на якість та роздільну здатність зображень, сформованих сканером системи ДЗЗ видимого діапазону 52
2.2. Аналіз впливу факторів на якість та роздільну здатність

зображень…….. 56

2.2.1. Вплив параметрів стабілізації КА на допустиме число стадій накопичення CCD8091 у сканері високої роздільної здатності……. 56

2.2.2. Вплив зміни висоти орбіти космічного апарата (КА) на вибір оптимальних значень часу експозиції і частоти сканування рядків фотоприймача CCD8091…….. 71

2.3. Вплив параметрів об'єктива пристрою формування зображення на якість формування зображення……. 75

2.4. Вплив апертури пікселя ПЗЗ-давача на якість сформованого зображення систем ДЗЗ…….. 76

Висновки до розділу 2……..... 81

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУБПІКСЕЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ СКАНЕРОМ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ……... 83

3.1. Принципи організації субпіксельної обробки зображень …….. 83

3.1.1. Принципи побудови оптичної системи для субпіксельної обробки……...……... 87

3.2. Матрична модель процесу субпіксельного формування зображень сканером……...…… 89

3.3. Вибір методу фільтрації при відновленні зображень……..…….. 94

3.3.1. Інверсна фільтрація ……..…… 96

3.3.2. Оптимальна фільтрація…….. 97

3.3.3. Метод регуляризації А. Н. Тихонова……..... 98

3.4. Процес обробки зображень з врахуванням впливу апертури пікселя……... 100

3.5. Оцінка роздільної здатності відновлених зображень з усуненням впливу апертури пікселя на основі тестової міри …… 104

3.6. Підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень. Вибір оптимального методу комплексування зображень.. 106

Висновки до розділу 3……. 113

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ТА АЛГОРИТМ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЗАСОБИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ…… 115

4.1. Метод та алгоритм субпіксельної обробки зображень……. 115

4.2. Тестування методу та алгоритму субпіксельної обробки зображень…… 119

4.3. Використання субпіксельної обробки в методах багатоспектрального комплексування зображень……..…. 125

4.3.1. Тестування алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень……..... 127

4.3.2. Програмна реалізація удосконаленого алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення…… 129

4.4. Структура та архітектура бортового процесора для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ ……... 131

4.5. Розрахунок обчислювальної складності алгоритму……..…... 135

4.6. Рекомендації по технічній реалізації програмно-апаратних засобів для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ…… 138

Висновки до розділу 4……...…. 141

ВИСНОВКИ…….. 143

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..... 146

ДОДАТОК А. БІБЛІОТЕКА ПІДПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З СУБПІКСЕЛЬНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ В ПАКЕТІ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ MATLAB……. 158

ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ……..…… 169

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛП – арифметико-логічний пристрій

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

КЧХ – контрастно-частотна характеристика

ЛБ – логічний блок

ПЗП – постійний запам’ятовуючий пристрій

ПЛМ – програмована логічна матриця

РЗ – просторова роздільна здатність

ФП – фотоперетворювач (фотоприймач)

ЧЗН – часова затримка та накопичення

CCD – charge coupled device – прилад з зарядовим зв’язком (ПЗЗ)

SNR – відношення сигнал/шум

ВСТУП

Актуальність теми. Створення та розвиток космічних засобів і технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є в даний час одним із найважливіших напрямків застосування космічної техніки для соціально-економічних та наукових цілей. Спостерігається швидкий прогрес в області підвищення технічного рівня космічних апаратів та скорочення витрат на їх створення та експлуатацію.

На сьогоднішній час, у зв’язку з розвитком систем моніторингу, існує потреба у підвищенні якості представлення зображень та роздільної здатності цих систем. Просторова роздільна здатність є найбільш важливою характеристикою систем моніторингу, яка визначає можливість використання цих систем в різних галузях дистанційного зондування, таких як геологія, екологія, сільське господарство, розвідка корисних копалин, управління водними ресурсами, містобудування та інших.

Вагомий внесок у дослідження і розвиток методів підвищення ефективності формування та відновлення зображень об’єктів і сцен систем ДЗЗ зробили українські та зарубіжні вчені: В.К. Волосюк, О.О. Зеленський, Р. Гонсалес, Р. Шовенгердт, У. Претт, Я. Фурман (теоретичні та прикладні основи обробки зображень); Г. Василенко, А. Тараторин, В. Горний, О. Железняк, Р.А. Воробель (відновлення зображень); А. Крилов, А. Насонов, Ш. Пелег (збільшення роздільної здатності зображень); П. Аткінсон, О. Лукін, Л. Ярославський, Т. Хуанг, О. Свенсон (методи фільтрації); С.В. Блажевич, Е.С. Селютина, С. Гао, В. Сун, Х. К. Якобсен, Х. Латрі, М. Нгуєн (методи субпіксельної обробки [2, 3, 4, 5, 67, 72, 73, 79, 80]; М. Усс, В. Душепа, (аналіз алгоритмів субпіксельної обробки); Т. Вінцюк, О. Івахненко, (методи підвищення якості зображень), А. Селиванов, І. Чулков (реалізація бортового процесора) та інші.

Найбільш широке застосування в системах ДЗЗ, які встановлюються на літальних апаратах, знайшли сканери, які працюють у видимому діапазоні хвиль.

Існує протиріччя між такими параметрами сканера, як роздільна здатність, ширина смуги зйомки та масо-габаритні показники. Для забезпечення високої роздільної здатності, на даний час, використовують довгофокусні об’єктиви або зменшують розмір пікселя. В першому випадку це призводить до збільшення масо-габаритних характеристик і до зменшення ширини смуги зйомки. Зменшення розміру пікселя є технологічно обмеженим і призводить до зниження його чутливості, а отже і чутливості всього сканера. Для підвищення чутливості застосовують більш світлосильні оптичні системи з більшим діаметром вхідної зіниці. Це призводить в свою чергу знову ж таки до збільшення масо-габаритних характеристик сенсора системи ДЗЗ.

Ефективним вирішенням вказаного вище протиріччя, тобто підвищення якості та роздільної здатності зображень із збереженням ширини смуги зйомки із заданими масо-габаритними параметрами є використання субпіксельної обробки. Вона дозволяє підвищити просторову роздільну здатність та якість зображення без збільшення кількості пікселів давача та зменшити фокусну відстань оптичної системи, вагу та габарити, що є дуже важливим для систем моніторингу.

Із літературних джерел відомі зарубіжні сканери з високою роздільною здатністю при використанні субпіксельної обробки. Виконані за індивідуальним замовленням для спеціального призначення, вони не можуть бути використані для вітчизняних космічних апаратів (КА) внаслідок неможливості їх придбання та дороговизни. Окрім того, відомі методи та алгоритми субпіксельної обробки зображень не враховують впливу на якість їх відновлення та роздільну здатність цілого ряду факторів, а саме: форми апертури пікселя лінійки, параметрів стабілізації КА на максимально-допустиму кількість рядків накопичення фотоприймача, зміщення положення

КА під час експозиції, нестабільності висоти орбіти КА та інших. Існуючі математичні моделі при зростанні кількості пікселів лінійки характеризуються значною кількістю математичних операцій, що призводить до додаткових часових та апаратних затрат.

Таким чином, актуальним є наукове завдання підвищення роздільної здатності сканерів видимого діапазону систем дистанційного зондування Землі, які встановлюються на космічних апаратах. Тому необхідним є розроблення удосконаленої математичної моделі процесу формування та відновлення зображень сканером видимого діапазону хвиль з субпіксельною обробкою та з урахуванням факторів впливу, а також використанням лінійно-фільтрової моделі процесу формування зображень у вигляді рівняння Фредгольма першого роду, з ядром типу згортки в спектральній області. Реалізація алгоритмів на базі сучасних цифрових мікропроцесорів та елементної бази дає можливість створення ефективних вітчизняних сканерів для літальних апаратів з помірним бортовим навантаженням, швидкодією та підвищеними якістю відновлення і роздільною здатністю.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Результати теоретичних і практичних досліджень, які наведені в дисертаційній роботі, одержані автором у Національному університеті «Львівська політехніка».

Результати дисертаційної роботи пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, які виконувалися на кафедрі «Радіоелектронні пристрої та системи», відповідають науковому напряму «Створення методологічних основ побудови ефективних радіоелектронних систем моніторингу об'єктів і сцен, зокрема систем з парціальними активними та пасивними каналами спостереження мікрохвильового діапазону хвиль» та тематиці досліджень кафедри, а саме:

- «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер»; № держреєстрації 0113U001355, 2013–2014 рр.

- «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» № держреєстрації 0115U000435, 2015-2016 рр.

Участь автора полягала в дослідженні переваг та обмежень субпіксельної технології обробки зображень; удосконаленні математичної моделі та розробці методу підвищення ефективності субпіксельної обробки зображень та якості їх відновлення сканерами видимого діапазону; усуненні впливу апертури пікселя лінійки сканера систем ДЗЗ та розробленні структури та архітектури бортового процесора корисного навантаження для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ; розробленні алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розроблення ефективних методів підвищення роздільної здатності в системах ДЗЗ видимого діапазону хвиль на основі субпіксельної обробки сигналів, зменшення масо-габаритних параметрів оптичної системи, розробка та удосконалення моделей та алгоритмів субпіксельної обробки зображень для підвищення якості та роздільної здатності як панхроматичного так і багатоспектрального каналів.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв’язано наступні завдання:

− оцінено методи підвищення якості відновлення та роздільної здатності сканерів систем моніторингу видимого діапазону;

− досліджено переваги та обмеження існуючих методів субпіксельної технології обробки зображень в сканерах видимого діапазону та виконано обґрунтування напрямку досліджень;

− удосконалено математичну модель процесу формування та відновлення зображень статичних об’єктів та сцен сканером;

− розроблено метод та алгоритм підвищення якості відновлення та роздільної здатності зображень з субпіксельною обробкою вхідних даних та з врахуванням впливу форми апертури пікселя лінійки та параметрів руху КА,

які базуються на оберненій згортці вхідного сигналу з урахуванням модуляційної передавальної функції сканера;

− проведено комп'ютерне моделювання та дослідження потенційних точностей (граничних похибок) оцінок параметрів сканера залежно від співвідношення сигнал/шум;

− розроблено структурну схему та архітектуру бортового процесора космічного апарата (КА) системи з субпіксельною обробкою сигналів;

− удосконалено метод підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень на основі методу субпіксельної обробки зображень;

− розроблено рекомендації по підвищенню просторової роздільної здатності апаратури корисного навантаження космічних апаратів.

Об'єкт дослідження – процес формування та обробки зображень в системах дистанційного зондування Землі.

Предмет дослідження – моделі, методи, алгоритми підвищення якості та роздільної здатності сенсорів видимого діапазону систем дистанційного зондування Землі з використанням субпіксельної обробки даних.

Методи дослідження базуються на основних положеннях теорії радіозв'язку – для оцінки впливу імовірності бітової помилки на якість відновлення зображень, матричного аналізу – для побудови моделі субпіксельної обробки зображень, теорії ймовірностей – для отримання математичних моделей оцінки завадостійкості, методів цифрової обробки та фільтрації сигналів і зображень – для відновлення зображень, комплексування даних – для підвищення інформативності та якості багатоспектральних зображень, комп'ютерного моделювання – для проведення моделювання роботи запропонованих алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено метод субпіксельної обробки зображень, який на відміну від відомих, враховує вплив апертури пікселя для сенсорів видимого діапазону

систем дистанційного зондування Землі та вплив параметрів руху КА, що дало змогу покращити якість зображення та підвищити просторову роздільну здатність.

2. Набули подальшого розвитку математична модель та алгоритм субпіксельної обробки вхідних даних сканера видимого діапазону для формування статичних зображень об’єктів і сцен, які на відміну від відомих, базуються на використанні рівняння Фредгольма першого роду з ядром типу згортки вхідних даних сканера з апертурною функцією в спектральній області, що дає змогу підвищити швидкодію та завадостійкість алгоритму.

3. Вперше запропоновано залежності для розрахунку максимально-допустимої кількості рядків накопичення у фотоприймачах з часовою затримкою та накопиченням (ЧЗН) із урахуванням положення КА на різних широтах земної поверхні, що покращує параметри, зокрема завадостійкість системи ДЗЗ.

4. Вперше запропоновано метод та алгоритм відновлення зображень з субпіксельною обробкою, який на відміну від відомих базується на оберненій згортці вхідного сигналу з врахуванням модуляційної передавальної функції $M_{\Sigma}(v_x,v_y)$, що зменшує вплив дестабілізуючих факторів, і, відповідно підвищує якість відновлення зображень та роздільну здатність сканера.

5. Удосконалено метод та алгоритм підвищення якості та роздільної здатності багатоспектральних зображень шляхом використання субпіксельної обробки, що дало змогу додатково підвищити якість багатоспектрального зображення.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Встановлено максимальне значення стадій накопичення ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою та накопиченням, що дає змогу одночасно зменшити масо-габаритні характеристики сканера, а також підвищити чутливість сканера без спотворення сформованого зображення;

2. Проведений аналіз ефективності геометричної форми пікселя за критеріями якості відновлення зображення та складності технічної реалізації дав можливість обґрунтувати вибір на користь форми, що наближена до круглої та дає виграш, в якості відновлення, порівняно з квадратною формою – 4-7%;

3. Удосконалено метод та алгоритм підвищення роздільної здатності панхроматичних та багатоспектральних зображень шляхом використання методу субпіксельної обробки зображень з урахуванням апертури пікселя, що дає змогу підвищувати роздільну здатність до 2 разів, зокрема – за умови присутності шумів;

4. Розроблено структурну схему процесорного модуля цифрової обробки сигналів, який реалізує запропонований удосконалений алгоритм субпіксельної обробки зображень.

Теоретичні положення та розроблені в дисертації пропозиції є важливим внеском у систему знань про процеси субпіксельного формування зображень сканерами видимого діапазону систем моніторингу об’єктів і сцен. Розроблені моделі, алгоритми та прикладні програми формування і обробки зображень можуть бути використані для створення нових сканерів систем ДЗЗ, встановлених на космічних апаратах. Результати проведених досліджень використовувалися в НДКІ «ЕЛВІТ» Національного університету «Львівська політехніка» при створені сканера для КА Січ-2М, у НКП ”Спеціальне конструкторське бюро телевізійних систем” (м. Львів), у навчальному процесі при підготовці фахівців з напряму «Радіотехніка» у Національному університеті «Львівська політехніка»; вони можуть знайти практичне застосування в КБ «Південне» (м. Дніпро), Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного та в інших наукових і проектних організаціях.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що становлять основу дисертаційної роботи, були сформульовані та одержані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать:

− [61], [63], [87], [90], [91] – розробка моделі для оцінки впливу апертури пікселя та її форми на якість відновлення зображень та інших факторів впливу на роздільну здатність зображень;

− [50], [62], [92] – розробка та створення моделі субпіксельної обробки з урахуванням впливу апертури пікселя;

− [76], [88] – розробка методу та алгоритму субпіксельної обробки зображень;

− [27], [37], [77], [89] – розробка моделі багатоспектрального комплексування;

− [47] – розробка алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, використовуючи субпіксельну обробку зображень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, представлені у дисертаційній роботі, були апробовані на наступних заходах: Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», Севастополь, 2013 р.; Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», м. Севастополь, 2013 р.; Міжнародній конференції «Computational Problems of Electrical Engineering», Розтоки, Чеська Республіка, 2013 р.; XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (TCSET–2014), смт. Славське, 2014 р.; Міжнародній конференції «Microwaves, Radar, and Wireless Communications», Гданськ, Польща, 2014 р.; Міжнародній конференції «Computational Problems of Electrical Engineering», м. Жиліна Словацька Республіка, 2014 р.; Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», Харків, 2015 р.; Міжнародній конференції «Computational Problems of Electrical Engineering», м. Львів, 2015 р.; XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (TCSET–2016),

смт. Славське, 2016 р.; Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», Харків, 2016 р.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, в тому числі 4 статті у фахових виданнях України та 1 стаття у виданні іноземної держави, з них 4 – у наукових періодичних виданнях включених до міжнародних науково-метричних баз Scopus [88] та Index Copernicus [47, 48, 90]; 12 є матеріалами і тезами на міжнародних науково-технічних конференціях, симпозіумах та форумах [27, 37, 49, 50, 61, 62, 63, 76, 77, 89, 91, 92], з них 4 [37, 62, 63, 76] опубліковані у виданнях, що входять до міжнародної науково-метричної бази Scopus.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літератури та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 172 сторінки, з них 131 сторінка основного тексту, 52 рисунка, 15 таблиць, список використаних джерел зі 104 найменувань на 12 сторінках, додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СКАНЕРІВ СИСТЕМ ДЗЗ ТА МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕНЬ

1.1. Аналіз вимог до сканерів систем ДЗЗ космічного базування

Одним із важливих напрямків застосування космічної техніки для вирішення наукових, комерційних, військових та інших задач є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), під яким розуміється одержання з космосу інформації про об’єкти, що розташовані на поверхні Землі. Актуальність завдань, що вирішуються методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), визначається розширенням застосування дистанційних методів в наукових і прикладних дослідженнях навколишнього середовища, в сільському і лісовому господарстві, екології та контролі надзвичайних ситуацій, військових цілях та інших. У більшості випадків інформація з космосу системами ДЗЗ передається у вигляді зображень сцен і об’єктів.

Основним джерелом інформації є електромагнітна енергія, яка випромінюється чи відбивається цими об’єктами, проходить через середовище розповсюдження і надходить на вхід приймача. Зрозуміло, що різні об’єкти мають не однакові спектрально-енергетичні та випромінюючі властивості, відрізняються розмірами та формою. Тому при виборі космічної системи ДЗЗ, за допомогою якої будуть формуватися зображення для вирішення конкретних задач, враховують такі важливі характеристики цієї системи, як спектральний діапазон приймача енергії та його просторова роздільна здатність, тобто спроможність розрізняти на поверхні Землі об’єкт з заданими мінімальними розмірами, здатність працювати при складних погодних умовах, завадо захищеність, масо-габаритні параметри та інші.

Відомо, що системи ДЗЗ забезпечують моніторинг практично у всіх діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектру. В залежності від

забезпечення градацій просторової роздільної здатності системами ДЗЗ розрізняють відповідно роздільну здатність (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Градації просторової роздільної здатності

Позначення	Роздільна здатність	Просторове розділення на поверхні Землі
Q	Надвисока	< 0,5 м
H	Висока	0,5…5 м
E	Середня	5…50 м
F	Низька	50…500 м
K	Наднизька	> 500 м

Зображення об’єкта чи сцени в загальному являє собою матрицю пікселів, значення яких отримані давачем зображення шляхом реєстрації відбитого від спостережуваних об’єктів випромінювання. Кожен піксель цифрового зображення представляється в двійковому вигляді, чим більше біт виділяється на кожне значення пікселя, тим більше інформації можете зберігати зображення.

Для вирішення багатьох задач та за масо-габаритними параметрами у системах ДЗЗ космічного базування найбільшу роль відіграють сканери, які працюють у оптичному (видимому та інфрачервоному) діапазонах електромагнітних хвиль [41, 47]. В залежності від задач, які вирішує сканер, видимий діапазон та частина ближнього інфрачервоного діапазону у свою чергу поділяються на ряд спектральних піддіапазонів. Більшість багатозональних сканерів використовують наступні спектральні піддіапазони [7,41,74,78]: «Синій» – $\Delta\lambda$=0,45…0,52 мкм; «Зелений» – $\Delta\lambda$=0,52…0,60 мкм; «Червоний» – $\Delta\lambda$=0,63…0,69 мкм; «Ближній інфрачервоний» – $\Delta\lambda$=0,76…0,89 мкм; «Панхроматичний» – $\Delta\lambda$=0,45…0,89 мкм. У якості перетворювачів енергії вхідного випромінювання в електричні сигнали в цих сканерах широко

застосовуються лінійні багатоелементні інтегральні фотоприймачі на основі приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ-лінійки або матриці) [24,42].

Сканування кожної смуги поверхні відбувається тією самою ПЗЗ-лінійкою в напрямку руху апарату, таке сканування можливе лише коли є рух сенсора відносно досліджуваної поверхні (рис. 1.1). При використанні ПЗЗ-матриці, самий сенсор може бути нерухомий відносно поверхні, значення пікселів всього зображення можуть отримуватися практично одночасно.

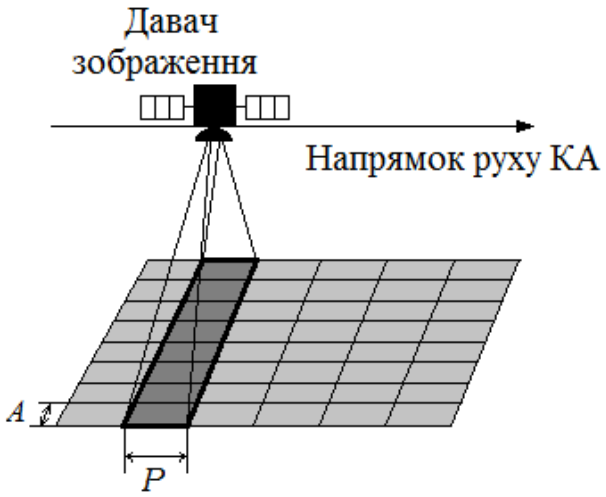


Рисунок 1.1 – Ілюстрація процесу сканування ПЗЗ-лінійкою

Фотоприймачі цього типу мають високу надійність, широкий динамічний діапазон, високу чутливість, малі габарити та масу, а також малу потужність споживання. ПЗЗ-лінійка розташовується в сканері перпендикулярно напрямку руху КА. Фоточутливі елементи (пікселі) лінійки мають розміри a у напрямку руху та b – у напрямку, перпендикулярному руху. Оптична система сканера з фокусною відстанню f_0' , при висоті орбіти H буде будувати на ПЗЗ-лінійці з $N_{пікс}$ пікселями зображення смуги поверхні Землі шириною A та довжиною P:[41]

$$A = \frac{a \cdot H}{f_0'}, \qquad P = \frac{b \cdot N_{пікс} \cdot H}{f_0'}. \tag{1.1}$$

Площу на поверхні Землі розміром A x P (де $P = A$), яка відповідає розмі-

ру зображення, що дорівнює одному пікселю, називають геометричною проекцією пікселя на Землю. Формування кадрового зображення у космічних сканерах відбувається за рахунок механічного переміщення сканера відносно поверхні Землі і зчитуванні даних з усіх пікселів рядка ПЗЗ-лінійки з періодичністю один раз після кожного наступного пересування сканера відносно поверхні Землі на відстань *A*. Таким чином можна отримати квадратні або довгі кадри зображення. При порівнянні просторової роздільної здатності різних сканерів звичайно користуються поняттям проекції пікселя на поверхню Землі, яка має розмірність у метрах (див. табл. 1.2), оскільки обидві грані цієї проекції, як правило, мають однаковий розмір. Застосування на практиці терміну “проекція пікселя на поверхню Землі” замість “роздільна здатність сканера” пояснюється тим, що роздільну здатність, суворо кажучи, треба оцінювати через *лінійне розділення на місцевості* (ЛРМ), яке залежить від конкретного значення контрасту об’єкта сканування, контрастно-частотних характеристик апаратури дистанційного зондування, стану атмосфери і реально може перевищувати значення проекції пікселя на 20...50%. [46]

У сканерах з низькою і середньою роздільною здатністю (з розміром проекції пікселя на поверхню Землі більше, ніж 5 м) застосовують звичайні ПЗЗ-лінійки, у яких всі фотоелементи (пікселі) розташовані в одному рядку. Такі ПЗЗ-лінійки мають розміри пікселів від 6.5 х 6.5 мкм до 13 х 13 мкм і загальну кількість пікселів від 2000 до 12000 [64, 99]. Україна вже має досвід у створенні та запуску на орбіту космічних апаратів з багатоспектральними сканерами середньої роздільної здатності [6]. При високій роздільній здатності суттєво зменшується час накопичення (тобто час інтегрування) світлової енергії пікселями фотоперетворювача (ФП), який дорівнює часу прольоту КА над поверхнею Землі на крок, рівний ширині смуги *A*. При цьому зменшується енергетична експозиція на вході ФП, знижуються рівні сигналів на його виході і через неприйнятне зменшення співвідношення сигнал/шум застосування звичайних ПЗЗ-лінійок стає практично неможливим. Враховуючи стан подій в

Україні та відсутність вітчизняних ДЗЗ з високою роздільною здатністю, стає актуальною задача створення вітчизняних сканерів з високою роздільною здатністю, з розміром проекції пікселя на Землю не більше 2 м. В космічних сканерах з високою роздільною здатністю (особливо при проекціях пікселя нижче 2 м) доцільно використовувати ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою і накопиченням (ЧЗН), які можуть забезпечити дуже великі значення фоточутливості. [55]

Давач з ЧЗН складається з багатьох лінійок, які виставлені в один ряд, їхня кількість прямо вказує на кількість так званих стадій накопичення заряду. Процес сканування даними лінійками відбувається наступним чином: сцена сканується першою лінійкою, після завершення накопичення заряду цей заряд переміщується в наступну лінійку, де відбувається сканування тієї ж частини поверхні, і так далі. Тактова частота переносу заряду вибирається рівною швидкості переміщення підсупутникової точки. Наприклад дня ЧЗН фотоприймача CCD8091 [59] максимальне значення стадій накопичення становить 128, що дозволяє підвищити значення сигналу в 128 разів, і в 11,3 рази значення відношення сигнал/шум. ЧЗН фотоприймачі дають можливість для сканування рухомих об’єктів. Підвищена чутливість дозволяє отримувати якісні, контрастні зображення навіть при низькому рівні освітленості, тобто має широкий динамічний діапазон, що є недосяжним для стандартних ПЗЗ-лінійок.

У порівнянні зі звичайними ПЗЗ-лінійками, внутрішня структура ПЗЗ- лінійок з ЧЗН є набагато складнішою [55,101], тому такі лінійки частіше називають фотоприймачами з часовою затримкою і накопиченням (ФП ЧЗН). Активна зона формування зображення у ФП ЧЗН являє собою матрицю, у якій кожен з N фотоелементів звичайної лінійки замінюється стовпцем з n фотоелементів з вертикальним регістром зсуву зарядів у вихідний горизонтальний регістр зсуву. Якщо швидкість переміщення (а одночасно й накопичення) зарядів у вертикальному регістрі зсуву зробити рівній швидкості переміщення зображення, то сумарний заряд на виході кожного з n стовпців

збільшиться у n разів. Інакше кажучи, при фіксованій тривалості часу рядка $T_{ряд}$ час інтегрування $T_{інт}$ тут можна збільшити до значення $T_{інт} = T_{ряд} \cdot n$, збільшивши тим самим вихідний сигнал ФП ЧЗН у n разів порівняно зі звичайною ПЗЗ-лінійкою. Вихідний шум ФП ЧЗН при цьому зростає в $\sqrt{n}$ разів, у стільки же разів зростає відношення сигнал/шум на виході ФП ЧЗН. Число n в літературі прийнято називати числом стадій ЧЗН [54,101]. У конструкціях багатьох ФП ЧЗН передбачена можливість зміни числа стадій ЧЗН (наприклад по ряду 2,4,8,16...128), що дозволяє змінювати фоточутливість ФП ЧЗН у великому діапазоні. У Табл.1.2 наведені деякі параметри сучасних багатоспектральних космічних сканерів з високою роздільною здатністю (з розміром проекції пікселя на Землю менше 2 м). Ці параметри одержані з джерел [6, 11, 18, 29, 56, 57, 82, 93, 97, 104] і стосуються тільки панхроматичних каналів сканерів (діапазон спектру $\lambda \approx 500...900$ нм). Оскільки розміри проекції пікселя на Землю ($P_{пан}$) залежать від висоти польоту КА над поверхнею Землі, то всі значення $P_{пан}$ у таблиці перераховані для однакової висоти орбіти $H = 680$ км. В Табл.1.2 вказані також ширина смуги захоплення у надирі ($L_{пан}$) для вищевказаної висоти, параметри об'єктива сканера – діаметр вхідного отвору (D), фокусна відстань (f'_o), відносний отвір (D/f'_o) та параметри застосованих фотоприймачів.

Таблиця 1.2

Параметри сучасних систем ДЗЗ видимого діапазону

Назва супутника	$P_{пан}$ (м)	$L_{пан}$ (км)	Параметри об'єктиву			Параметри фотоприймачів
			D (мм)	f'_0 (мм)	D/f'_0	
Pleiades (Франція) [57]	0,7	21	650	12900	1: 19,8	ПЗЗ-лінійки з ЧЗН, 5 шт. послідовно, по 6000 пікселів 13 х13 мкм^2 у кожній, n – всього 15 стадій

Продовження таблиці 1.2

Назва супутника	$P_{пан}$, м	$L_{пан}$, км	Параметри об'єктиву			Параметри фотоприймачів
			D, мм	f'_0, мм	D/f'_0	
Ikonos-2 (США) [6, 29]	0,82	11	700	10000	1: 14,3	ПЗЗ-лінійка з ЧЗН, 13500 пікселів 12 х 12 мкм^2, n = 10,18,24,32
Quick Bird-2 (США) [93]	0,93	25	600	8800	1: 14,6	ПЗЗ-лінійка з ЧЗН, 27000 пікселів 12 х 12 мкм^2, n = 10,13,18,24,32
Eros–B (Ізраіль) [6, 29]	0.94	9,4	505	5050	1: 10	ПЗЗ-лінійка з ЧЗН, 10000 пікселів 7х 7 мкм^2, n – до 64 стадій макс.
Kompsat-2 (П. Корея) [6, 57, 82]	1,0	15,6	600	9000	1: 15	ПЗЗ-лінійки з ЧЗН, 3 шт послідовно, по 5200 пікселів 13х13 мкм^2 у кожній, n= 8...64
Ресурс- П (Росія) [6]	1,53	55	500	4000	1: 8	ПЗЗ-лінійка з ЧЗН, 36000 пікселів 9 х 9 мкм^2, n=8,16,24,32,64

Із таблиці можна зробити висновок, що у всіх сканерах з просторовим розділенням менше 2 м застосовані ФП ЧЗН з розміром пікселів від 7х7 мкм^2 до 13х13 мкм^2 та числом стадій n від 8 до 64, причому деякі сканери, наприклад

Quick Bird 2, використовують ряд дуже близьких між собою значень *n*, не кратних 2^n.

Дані системи через високу роздільну здатність, тобто малий розмір проекції пікселя на поверхню, мають малу смугу захоплення. Для збільшення ширини смуги захоплення можна використати кілька ПЗЗ-лінійок, які розташовані в ряд, але найкращим виходом є використання субпіксельної обробки [5, 48, 50, 67, 70, 73, 74, 74, 79, 83, 88, 92], вона дозволяє збільшити ширину смуги захоплення, зі збереженням заданої роздільної здатності.

1.2. Оцінка роздільної здатності елементів зображення в сканерах ДЗЗ видимого діапазону

Формування зображень високої якості є найважливішим завданням систем дистанційного зондування Землі. Якість цифрового зображення характеризується в першу чергу його роздільною здатністю яка в свою чергу визначається кількістю пікселів з яких воно складається, проте не завжди висока роздільна здатність сформованого цифрового зображення свідчить про його хорошу якість. Пов’язано це з тим, що роздільна здатність цифрового зображення – це кількість точок (пікселів) на одиницю площі, і ця кількість не несе в собі інформації про якість передачі зображення об’єкта оптичною системою пристрою формування. Тому, якість сформованого цифрового зображення слід розглядати та оцінювати як роздільну здатність оптичної системи в комбінації з давачем зображення [6,41,74,78].

Оптичне зображення точки, сформоване об’єктивом, являє собою нечітку, розпливчасту пляму, що затрудняє роздільне відтворення дрібних деталей на фотознімку. Це відбувається внаслідок наявності залишкових аберацій об’єктива і дифракції, яка порушує прямолінійне поширення світла і створює складний розподіл освітленості в площині зображення. У зв’язку з цим точка зображується у вигляді плями, оточеної дифракційними кільцями з спадаючою

яскравістю. Тому під роздільною здатністю розуміють здатність оптичної системи зображати роздільно два близько розташованих точкових предмета [23].

Просторове розділення сканера залежить не тільки від параметрів ФП ЧЗН, а і від параметрів об’єктива. При заданій висоті орбіти H та лінійних розмірах пікселя a вибраного ФП ЧЗН розмір проекції пікселя на Землю P визначає саме фокусна відстань об'єктива f_0' (1.1).

Звідси можна зробити висновок, що для сканерів з високою роздільною здатністю краще застосувати ФП ЧЗН з максимальною кількістю пікселів у рядку, а розміри пікселів для зменшення фокусної відстані об'єктива повинні бути мінімальні.

Розглянемо оптичну систему формування зображення звичайною ПЗЗ-лінійкою у складі сканера, який встановлений на КА з висотою польоту H і який при фокусній відстані об’єктива f_0' забезпечує лінійне розділення P на поверхні Землі (рис. 1.1). Як правило, у якості фотоприймачів в таких сканерах застосовуються ПЗЗ-лінійки з великою кількістю n елементів і малими розмірами фоточутливих пікселів.

Як сказано вище, ділянка на поверхні Землі розміром $A \times P$, яка відповідає розміру зображення, що формується одним пікселем, називається геометричною проекцією пікселя на Землі.

У ЧЗН-фотоприймачах з метою підвищення вихідного сигналу відбувається послідовне накопичення сигналів від одного і того же об'єкту зйомки на Землі (однієї і тієї же поточної смуги шириною A), одержаних з виходів багатьох лінійок (рядків) ЧЗН-фотоприймача, які розташовані одна за одною в напрямку руху КА і переміщуються над вищевказаним об'єктом за рахунок переміщення КА над Землею. Зрозуміло, що для виключення розмивання зображення геометрична проекція кожного пікселя у першому рядку ЧЗН-фотоприймача повинна абсолютно точно співпадати (як за розташуванням на Землі, так і за формою і розмірами) з геометричною

проекцією відповідного пікселя у всіх наступних рядках фотоприймача. Однак при надмірному збільшенні числа стадій ЧЗН (тобто кількості задіяних рядків накопичення у ЧЗН-фотоприймачі) таке точне співпадіння вищевказаних проекцій із-за похибок просторової орієнтації КА стає практично неможливим, що може призвести до розмиття зображення, тобто до погіршення роздільної здатності сканера.

В даний час для оцінки якості зображення використовують два критерії: граничну роздільну здатність – критерій Релея і оптичну передавальну функцію – критерій Фуко [23,34].

Гранична роздільна здатність – це мінімальна відстань між двома точками, при якій їх зображення можна відрізнити від зображення однієї точки.

Критерій Релея свідчить, що при провалі в розподілі інтенсивності в зображенні двох близьких точок в 20% точки сприйматимуться як роздільні. Для цього необхідно, щоб центральний максимум в зображенні однієї точки припадав на перший мінімум в зображенні іншої (рис. 1.2) [34].

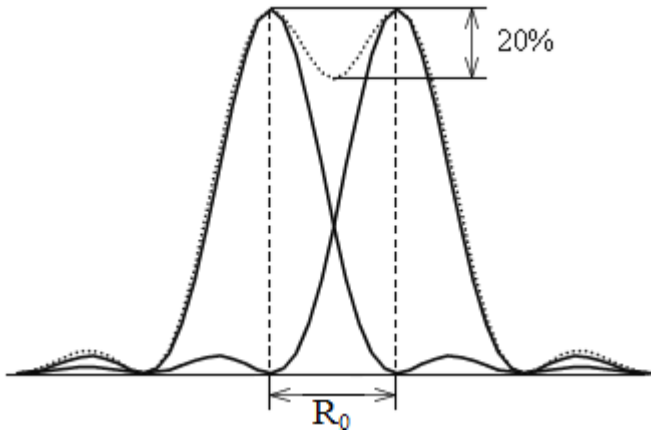
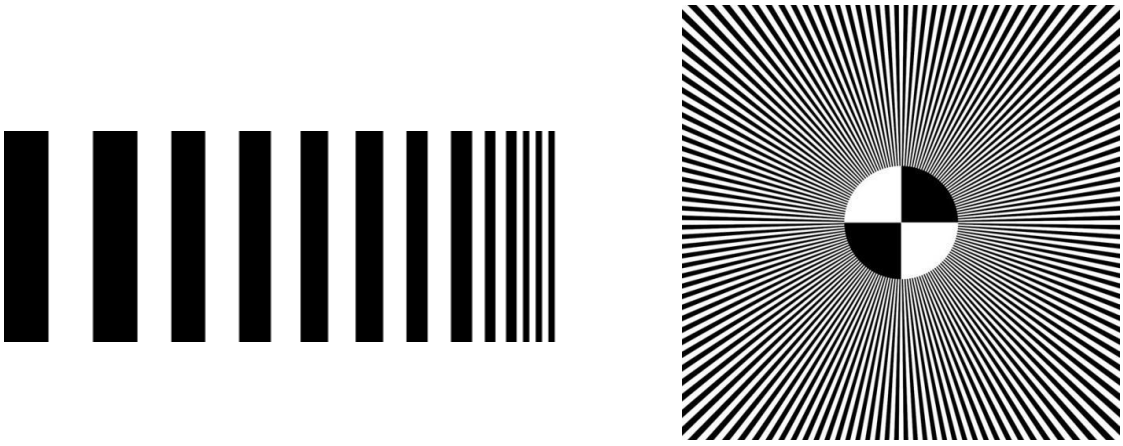


Рисунок 1.2 – Роздільна здатність за критерієм Релея

Критерій Фуко застосовується для оцінки якості зображення оптичних систем, які передають зображення об’єктів складної структури. Роздільна здатність R_0 визначається як максимальна просторова частота періодичного тест-об’єкта, що складається з чорно-білих штрихів (мір Фуко), в зображенні якого ще помітні штрихи. Роздільну здатність зазвичай визначають для мір одиничного (абсолютного) контрасту за графіком контрастно-частотної

характеристики (КЧХ) оптичної системи. Рівень контрасту лежить в межах 0-1. Просторова роздільна здатність R_0 визначається для заданого контрасту (зазвичай для контрасту 0,2), визначається як кількість ліній на міліметр [34]. Тобто на даному етапі під просторовою роздільною здатністю розуміємо величину яка відповідає кількості ліній на один мм, які може розрізнити система.

Для визначення граничної роздільної здатності використовують тестові зображення, які називаються мірами. Найчастіше використовують штрихову (рис. 1.3 а) та радіальну (рис. 1.3 б) міри. Дані міри фотографуються з подальшим використанням критерію Релея або Фуко, для одержання значення роздільної здатності.



а) б)

Рисунок 1.3 – Міри: а) штрихова, б) радіальна

В залежності від використовуваної міри роздільна здатність визначається за формулами:

- для штрихової міри [9]

$$R_0 = \frac{f_0'}{l_0 F_K}, \ [1/\text{мм}] \tag{1.2}$$

де l_0 [мм] – ширина ліній в оригіналі міри;

f_0' і F_K [мм] – фокусні відстані, відповідно досліджуваного об’єктива і об’єктива коліматора – оптичної системи, що дає на виході паралельний пучок

променів, який імітує світловий потік нескінченно віддаленого предмета, і призначена для оптичних досліджень об’єктивів;

- для радіальної міри [9]

$$R_0 = \frac{N_k}{\pi d_k}, \quad [1/\text{мм}] \tag{1.3}$$

де d_k [мм] – діаметр кола нечіткості в центрі зображення міри;

N_k – загальна кількість ліній радіальної міри;

$R_0\,[1/\text{мм}]$ - просторова роздільна здатність.

Діаметр кола нечіткості визначають за допомогою критерію Релея.

Роздільна здатність для реальних оптичних систем, що мають великий кут поля зору, змінюється до країв знімка в порівнянні з роздільною здатністю в центрі. Ця зміна значна і навіть в добре відкоригованих об’єктивах досягає близько 40%. Якісна оцінка оптичної системи проводиться також за критерієм добротності q_∂ [9]. Це поняття полегшує порівняння різних систем ДЗЗ, що мають різні фокусні відстані. Значення добротності системи визначається формулою

$$q_\partial = 2R_0\, f_0'. \tag{1.4}$$

де f_0'[мм] – фокусна відстань оптичної системи.

Роздільну здатність на місцевості P можна визначити [9]:

$$P = \frac{H}{q_\partial}. \tag{1.5}$$

де H [м] – висота зйомки.

З формули (1.5) видно, що при одній і тій же висоті зйомки найменшу величину роздільної здатності на місцевості P буде отримано об’єктивом, у якого добротність більша, тобто інформаційна здатність фотографічної системи характеризуватиметься величиною добротності. Розміри і кількість сфотографованих об’єктів залежать від якості оптичної системи, тобто від її добротності. У сучасних знімальних системах величина добротності може бути

від декількох тисяч до ста тисяч і визначається значною мірою величиною фокусної відстані [23].

Просторове розділення об’єктива має обмеження, викликане дифракцією променів на вхідній зіниці об’єктива, а також різними аберраціями. Цю здатність прийнято оцінювати, як було сказано вище, по радіусу кола розсіювання R_0, величина якого для ідеального об’єктива, згідно з критерієм Релея, дорівнює радіусу першого темного кільця у дифракційній картині точки, що світиться [34]:

$$r_{1к} = 1,22\lambda\left(\frac{f_0'}{D}\right), \tag{1.6}$$

тобто чим більший діаметр вхідного отвору *D*, тим менша точка зображення, яку спроможний відтворити об’єктив у своїй фокальній площині. Як видно, границя фізично можливої роздільної здатності сканера залежить від апертури оптичної системи, тобто від діаметра вхідного отвору об'єктива *D*. Зв’язок між роздільною здатністю *P* у панхроматичному каналі сканера та діаметром оптики показаний на рис.1.4 із [96].

Нижня крива на рис.1.4 відноситься до майже ідеального об’єктива, а зона між двома кривими обмежує розмір оптики для даного розділення. Наприклад, для одержання P = 1 м можна застосувати об’єктив з діаметром вхідної зіниці від 0,5 м до 0,8 м у залежності від вимог до якості зображення та використаних приймачів зображення.

У відповідності з необхідним діаметром вхідної зіниці оптики визначається вага і вартість сканера. А оскільки від ваги сканера і супутника у цілому залежить вартість виводу КА на орбіту, приходимо до висновку, що при заданій роздільній здатності необхідно по можливості мінімізувати діаметр об’єктива *D*.

В той же час треба пам’ятати, що розмір діаметра об’єктива суттєво впливає на енергетичну роздільну здатність сканера (відношення сигнал /шум).

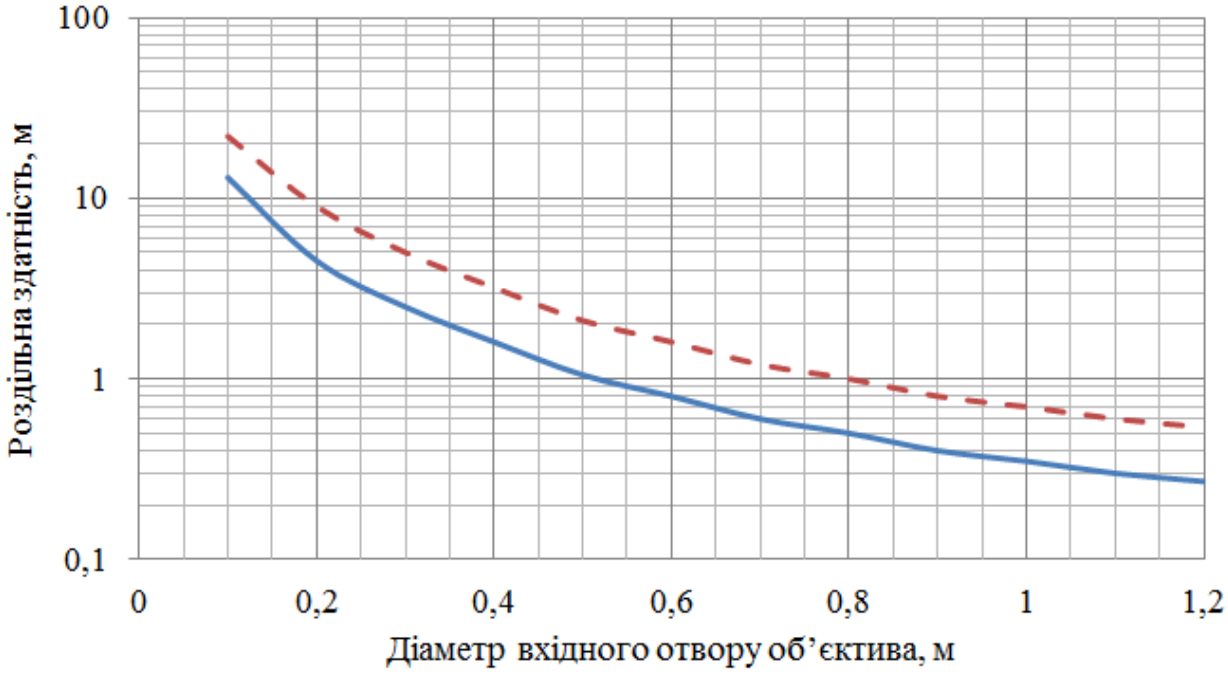


Рисунок 1.4 – Залежність роздільної здатності сканера від діаметра об'єктива

Із Табл.1.1 бачимо, що розміри діаметра об'єктива D сканерів знаходяться у межах від 500 мм до 700 мм, а розміри фокусної відстані – від 3320 мм до 12900 мм. При розмірах $P_{пан}$ близько 1 метра найменший об'єктив має сканер Eros-B за рахунок використання ФП ЧЗН з найменшим розміром пікселя.

1.2.1. Функція розсіювання точки

В ідеальній оптичній системі, вільній від дифракції, точка зображується у вигляді точки, тоді як в реальній оптичній системі точка зображується у вигляді плями розсіювання (диска Ейрі, для систем з круглою апертурою діафрагми) (рис. 1.5). [30, 34]

Основною характеристикою, яка описує передачу структури предмета оптичною системою є функція розсіювання точки. [9,23,28]

Функція розсіювання точки (ФРТ, point spread function, PSF) $h(\xi,\eta)$ – це функція, яка описує залежність розподілу освітленості об'єкта від координат ξ і η в площині зображення сканера, якщо об'єкт – це точка.

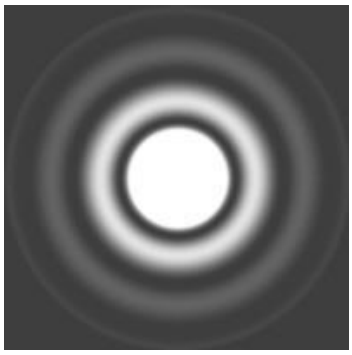


Рисунок 1.5 – Диск Ейрі

Якщо деякий об’єкт з координатами x і y описується функцією $f(x,y)$, то виходячи із згаданої вище умови просторової інваріантності до зсуву, кожна його точка (при розгляді за обома координатами) зображуються у вигляді функції $h\left(\xi - V'_{зб}x, \eta - V'_{зб}y\right)$, де $V'_{зб}$ – коефіцієнт збільшення, тобто ФРТ зміщується в точку з координатами $(V'_{зб}x, V'_{зб}y)$, а зображення всього об’єкта буде представляти собою суму ФРТ цих точок [9,23,28]:

$$G(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{\infty}\int f(x,y)h(\xi - V'x, \eta - V'y)dxdy. \qquad (1.7)$$

Якщо $V'_{зб}$ прийняти рівним одиниці, то вираз (1.7) стає згорткою (конволюцією).

Отже, розподіл інтенсивності яскравості в зображенні сканера це згортка функції об’єкта з ФРТ:

$$G(\xi,\eta) = f(x,y) \otimes h(\xi,\eta). \qquad (1.8)$$

1.2.2. Контрастно-частотна характеристика

Оптична передавальна функція (ОПФ, optical transfer function, OTF) $D(\omega_\xi,\omega_\eta)$ характеризує передачу структури об’єкта оптичною системою як функція просторових частот ω_ξ і ω_η .

ОПФ зв’язана з ФРТ перетворенням Фур’є:[87, 88]

$$D\left(\omega_\xi,\omega_\eta\right) = \int_{-\infty}^{\infty}\int h\left(\xi,\eta\right)\cdot \exp\left[-j\left(\omega_\xi\xi,\omega_\eta\eta\right)\right]d\xi d\eta. \qquad (1.9)$$

ФРТ показує, як оптична система зображує точку, тоді як ОПФ показує, як змінюється комплексна амплітуда контрастності об’єкта в залежності від просторової частоти.

Модуль ОПФ називається модуляційною передавальною функцією (МПФ) або контрастно-частотною характеристикою (КЧХ).

Контрасно-частотна характеристика показує залежність контрасту зображення від просторової частоти. Для ідеальної оптичної системи (без дифракції) КЧХ – має вигляд прямої лінії, яка паралельна осі частот (при розгляді по одній з координат).

Якщо враховувати наявність дифракції, то КЧХ спадає в області високих просторових частот) (рис. 1.6). При круглій апертурі і просторово-некогерентного освітлення об’єкта КЧХ центральносиметрична, причому ФРТ має характерну кільцеву структуру. Центральний максимум такої структури, в якому зосереджена основна частина енергії випромінювання, відомий, як диск Ейрі (рис. 1.5).

Для прикладу проведено моделювання процесу сканування тестової міри (рис. 1.6 а) використовуючи модель об’єктива з роздільною здатністю 45 лін/мм. В результаті отримано скановане зображення тестової міри (рис. 1.6 б).

а)

б)

Рисунок 1.6 – Моделювання процесу сканування: а) тестова міра; б) тестове зображення після сканування

В результаті побудовано контрастно-частотну характеристику (рис. 1.7). Для даного випадку просторова частота становить 45 лін/мм.

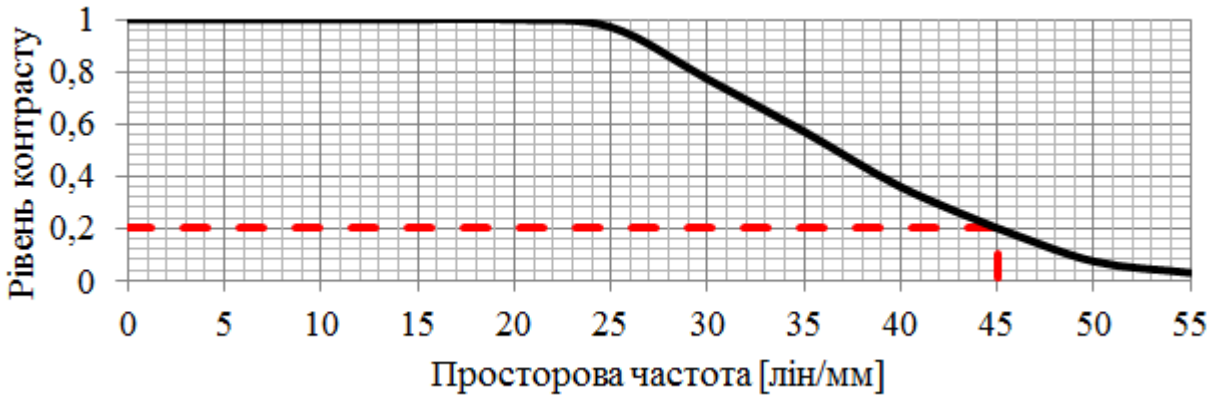


Рисунок 1.7 – Приклад нормованої контрастно-частотної характеристики для реальної оптичної системи

З графіка КЧХ для реальної оптичної системи (рис. 1.7), для ідеальної КЧХ була б прямою лінією, можна зробити висновок, що пристрій формування з такою КЧХ подавляє високочастотні складові які відповідають за дрібні деталі в зображенні, що призводить до розмиття зображення.

1.2.3. Оцінка параметрів фотоприймача ЧЗН та його вибір для сканера високої роздільної здатності

При порівнянні параметрів ФП ЧЗН та виборі фотоприймача ми будемо орієнтуватися на його застосування у сканері високої роздільної здатності для малих КА, тобто вибирати ФП ЧЗН з невеликим розміром пікселя. Пошук інформації щодо ПЗЗ - фотоприймачів з часовою затримкою та накопиченням (ЧЗН) у Інтернеті показав, що перелік ФП ЧЗН дуже обмежений [58, 59, 64, 65, 98]. У Табл.1.3 наведені стислі характеристики відомих типів ФП ЧЗН. Усі ФП ЧЗН, які перераховані у таблиці, можуть сканувати зображення у двох протилежних напрямках, але при застосуванні їх у космічних сканерах ця можливість звичайно не використовується. Серед наведених типів ФП ЧЗН звертають на себе увагу фотоприймачі фірми Fairchild Imaging [58, 59, 64], ПЗЗ-лінійки якої сертифіковані для космічного використання, а деякі типи лінійок вже навіть використовувались у космічних апаратах (КА). CCD525 та

CCD5045 мають зменшену кількість пікселів у рядку і великий розмір пікселів, що не підходить для космічного сканера малого КА. Фотоприймачі CCD5061 й CCD8091 по всіх параметрах аналогічні приймачу CCD10121, але мають меншу кількість пікселів у рядку порівняно з CCD10121, завдяки чому зменшуються їхні габаритні розміри й кількість виходів даних. Найкраще за кількістю пікселів підходить ФП ЧЗН типу CCD21241, але приймачі CCD10121, CCD21241 і CCD21121 мають подвійне призначення (цивільне та військове), тому виготовляються і поставляються тільки по спецзамовленню, одержання дозволу на поставку цих лінійок зі США в Україну є практично неможливим. Фотоприймачі S10202-08 та S10202-16 фірми Hamamatsu [98] мають малу кількість пікселів, фіксовану кількість стадій ЧЗН і не сертифіковані для космічного використання, що робить їх непридатними для застосування в космічних сканерах.

При аналізі параметрів фотоприймачів, застосованих у реальних сканерах (див. табл.1.2) звертає на себе увагу факт, що майже всі ФП ЧЗН у цих сканерах мають параметри, які відрізняються від параметрів серійних ФП ЧЗН, наведених у табл.1.3.

Таблиця 1.3

Параметри серійних ФП ЧЗН

Найменування ФП ЧЗН	Виробник ФП ЧЗН	Розмір пікселя (мкм^2)	Кількість пікселів у рядку	Число стадій ЧЗН, (n)	Кількість виходів ФП ЧЗН	Швидкість виводу даних (МГц)
CCD525	FAIRCHILD IMAGING (США)	13x13	2048	24,32,48, 64,96	4	4x25
CCD5045		13x13	4096	24,32,48,64,96	4	4x25

Продовження таблиці 1.3

CCD5061		8,75x8,75	6144	4,8,16,32,64,96,128	4	4x20
CCD8091		8,75x8,75	9216	4,8,16,32, 64,96,128;	6	6x20
CCD10121		8,75x8,75	12288	4,8,16,32, 64,96,128;	8	8x20
CCD21241		8,75x8,75	24000	1,8,32,64	16	16x18
CCD21121		17,5x17,5	12000	1,8,32,64	8	8x18
S10202-08	HAMAMATSU (Японія)	12 x 12	4096	128	8	8x30
S10202-16		12 x 12	4224	128	16	16x30

Тільки у сканері Go Blue (США), схоже, застосовано серійні фотоперетворювачі типу CCD5061, решта сканерів використовують ФП ЧЗН, які виготовлені у одиничних екземплярах спеціально для даного сканера. Так, наприклад, сканер Quick Bird-2 (США) для розширення смуги захоплення обладнаний фотоприймачем з 27000 пікселями 12 х 12 мкм^2 у рядку, причому *n* змінюється по нестандартному ряду (10,13,18,24,32), а Ресурс-П (Росія) має ФП ЧЗН аж з 36000 пікселями 9 х 9 мкм^2. Розробка подібних спеціальних ФП ЧЗН коштує, за нашими даними, більше мільйона доларів США і є неприйнятна.

Враховуючи вищенаведене, зупиняємо свій вибір на фотоприймачі ЧЗН типу CCD8091, який при відносно невеликих габаритах має 9216 пікселів у рядку, невеликі розміри пікселів, 6 виходів з великою швидкістю вивода даних (до 20 Мгц/вихід) і, що важливо, який можна придбати. Розширення смуги захоплення можливе за рахунок послідовного встановлення в один ряд кількох фотоперетворювачів CCD8091 і оптичної стиковки країв цих ФП у фокальній площині об'єктива сканера.

У табл. 1.4 приведено основні параметри ФП ЧНЗ CCD8091.

Таблиця 1.4

Основні параметри ПЗЗ-лінійки з ЧЗН CCD8091

Піксельна область (поперек ЧЗН-сканування)	9216 пікселів = 6 секторів х 1536 пікс/ЧЗН-сектор
Піксельна область (вдовж ЧЗН-сканування)	розмір регулюється зміною часової діаграми: 4, 8, 16, 32, 64, 96 чи 128 пікс/ЧЗН-стовпець
Напрямок ЧЗН-перенесення	двоспрямований («наверх» чи «наниз»)
Розмір пікселя	8,75 мкм х 8,75 мкм
Розмір області формування зображення	80,64 мм х 1,12 мм
Кількість вихідних портів	6 зверху (перенесення «наверх») та 6 знизу (перенесення «наниз»)
Швидкість зчитування пікселів/вихід (макс)	20 Мпікселів/сек/вихід
Загальна швидкість зчитування пікселів з виходa ФП	120 Мпікс/сек = 20 Мпікс/сек/вихід х 6 виходів
Регістри вертикального зсуву	Трьохфазні, по одному регістру у кожному із 9216 стовпців
Регістри горизонтального зсуву («послідовні»)	4-х фазні, 6 регістрів зверху та 6 регістрів знизу, у кожному регістрі 1536 комірок

Важливим параметром ПЗЗ-давача є рівень темнового сигналу. Темновий сигнал це сигнал, що виникає на виході ПЗЗ-давача при відсутності падаючого світла.

Для оцінювання величини темнового сигналу (DS – dark signal) зробимо перерахунок його максимального значення, заданого у нА/см^2, в максимальне значення напруги темнового сигналу на виході CCD8091, виражене у одиницях мВ:[59]

$$U_{DS}\left[мВ\right]=\frac{\left(I_D\cdot CVF\cdot T_{\text{int}}\right)\cdot 10^{-15}}{q}, \qquad (1.10)$$

де I_D = I_D [нА/см^2] · $S_{пікс.}$ [см^2] – темновий струм фотодіода, [нА];

CVF – коефіцієнт перетворення заряду у напругу = 3,3[мкВ/ē];

T_{int} – час інтегрування, [мс];

q – заряд електрона = 1,6·10^{-19} [к];

$S_{пікс.}$ – площа пікселя CCD8091 = 76 · 10^{-8} [см^2].

Значення T_{int} для сканерів з проекцією пікселя 1м не перевищує 0,15мс, тому значення U_{DS} із (1.10) не перевищить 0,014 мВ при температурі +25ºС для однієї стадії ЧЗН. Але треба прийняти до уваги, що при збільшенні числа стадій ЧЗН у n разів у стільки же разів зростає значення U_{DS} за рахунок підсумовування теплових електронів пікселів у вертикальних регістрах зсуву. При проведенні програмної компенсації рівнів темнових сигналів ФП цей факт обов'язково необхідно враховувати.

У таблиці специфікації основних параметрів CCD8091 відсутній один з найголовніших параметрів, а саме значення інтегральної фоточутливості фотоприймача $R_ф$ [В/(мкДж/см^2)] у заданому спектральному діапазоні.

Для знаходження цього значення скористаємося графіком типової залежності квантової ефективності (*QE*) від довжини хвилі λ для CCD8091 [22], наведеним на рис.1.8. Із цього графіка для кожного поточного значення λ визначимо відповідні значення $R_ф(\lambda)$, користуючись виразом:[31]

$$R_ф(\lambda)\left[B/\left(мкДж/см^2\right)\right]=\frac{\left(QE(\lambda)\cdot S_{пікс.}\cdot\lambda\cdot CVF\right)}{10^{29}\cdot h_{пп}\cdot C}, \quad (1.11)$$

де $QE(\lambda)$ – квантова ефективність на даній довжині хвилі, у відносних одиницях;

$S_{пікс.}$ – площа пікселя CCD8091, [мкм^2];

λ – довжина хвилі [нм], на якій визначається поточне значення $R_ф(\lambda)$;

$h_{пп}$ = 19,9·10^{-34}[Дж·с] - постійна Планка;

C = 3·10^8[м/с] – швидкість світла у вакуумі.

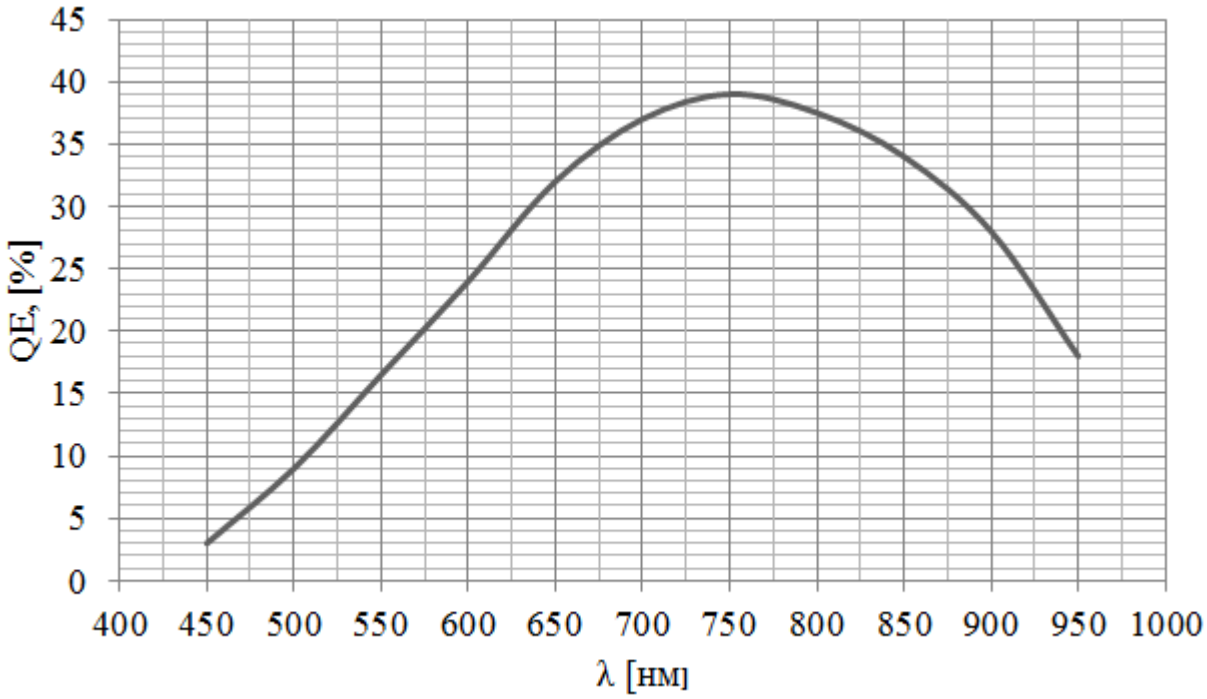


Рисунок 1.8 – Типова крива квантової ефективності $QE = f(\lambda)$ для CCD8091

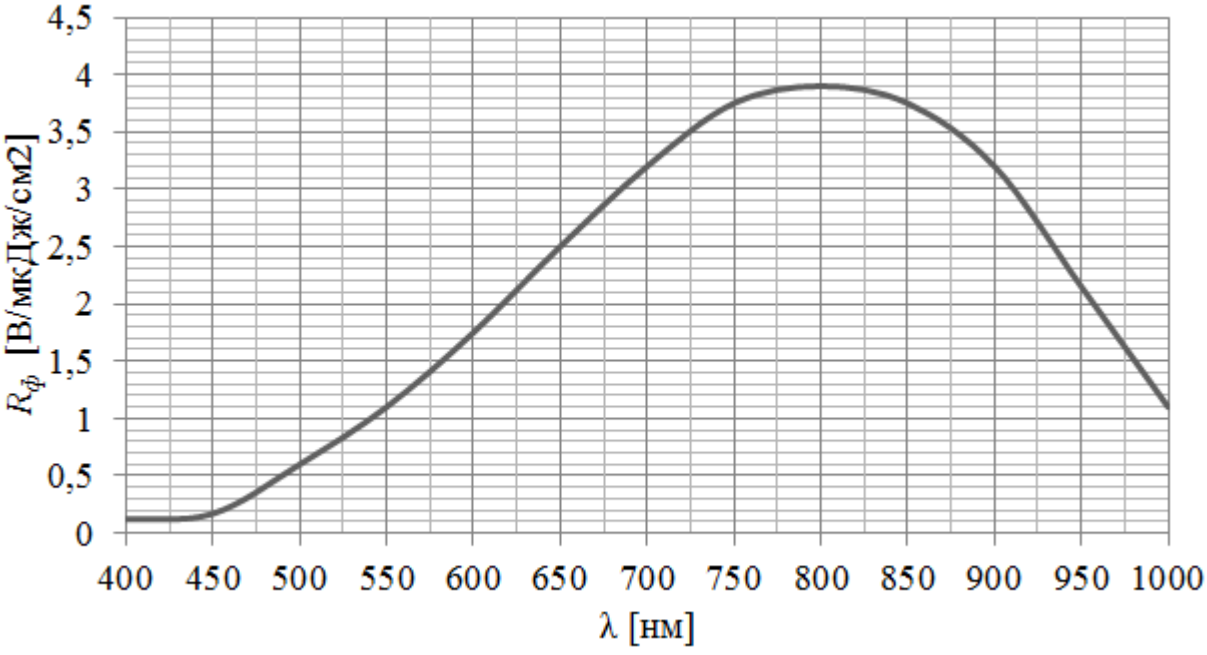


Рисунок 1.9 – Типова залежність фоточутливості R_ϕ CCD8091 від довжини хвилі для однієї стадії ЧЗН.

На підставі розрахунків згідно з виразом (1.11) побудуємо графік типової спектральної фоточутливості $R_\phi(\lambda)$ для CCD8091, показаний на рис. 1.9. Значення R_ϕ тут наведені для однієї стадії ЧЗН. Користуючись цим графіком,

можна визначити типове інтегральне значення R_{int} для будь-якого заданого діапазону хвиль від λ_{min} до λ_{max}. При використанні n стадій ЧЗН одержане значення R_{int} помножиться на n за рахунок накопичення вихідного сигналу фотоприймача.

1.2.4. Аналіз перспективності застосування CCD8091 у сканерах з високою роздільною здатністю

Для розроблення рекомендацій застосування сенсора CCD8091 у сканерах космічного базування проведемо дослідження його властивостей.

При кількості пікселів N_{pix} у рядку лінійки ЧЗН, заданому розмірі проекції пікселя на Землю P та швидкості підсупутникової точки $V_{\text{пт}}$ ФП ЧЗН повинен забезпечити частоту виводу даних F не менше, ніж: [55,101]

$$F = \frac{N_{pix} \cdot V_{ПТ}}{P} \quad [\text{МГц}]. \tag{1.12}$$

Із цього виразу знайдемо, що ФП ЧЗН типу CCD8091 , який має N_{pix}=9216 та F_{MAX} = 120 Мгц , при типовому значенні $V_{\text{пт}} \approx$ 7км/с може, у принципі, забезпечити навіть просторове розділення сканера на рівні $P_{MIN} \approx$ 0,54 м. Однак при такій роздільній здатності необхідно використати у сканері дуже великий об'єктив з діаметром вхідного отвору $D \approx$ 750...800 мм (див. графік на рис. 1.4), що, як показано вище, неприйнятне для сканерів малих та дешевих КА. Тому для одержання мінімально-можливих розмірів об'єктива при подальшому аналізі будемо орієнтуватися на забезпечення панхроматичним сканером розміру проекції пікселя біля 2 м, наприклад P = 1,9 м , при висоті польоту КА над поверхнею Землі H = 490 км.

Для одержання величини проекції пікселя P = 1,9 м необхідно, щоби величина фокусної відстані об'єктиву при лінійному розмірі пікселя a = 8,75 мкм дорівнювала :

$$f_0' = \frac{a \cdot H}{P} = \frac{8{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 490 \cdot 10^3}{1{,}9} = 2257 \text{ мм}, \tag{1.13}$$

тому обираємо f_0' =2260 мм. При такій фокусній відстані уточнене значення проекції P =1,897 м. Для вибору мінімального необхідного діаметра вхідного отвору об'єктива необхідно провести аналіз залежності відношення сигнал /шум сканера та лінійного розділення на місцевості (ЛРМ) від діаметра вхідної зіниці для заданих умов сканування при різних стадіях накопичення n фотоприймача CCD8091. На рис. 1.10 наведена залежність відносного розділення (тобто відношення ЛРМ до проекції пікселя P) від діаметра об'єктива D при f_0' =2260 мм, P = 1,897 м та при умові низької освітленості CCD8091 (альбедо 0,2; кут Сонця 40º) у панхроматичному спектральному діапазоні Δλ = 0,5...0,9 мкм. Ця залежність одержана шляхом розрахунків за методикою, запропонованою у [46].

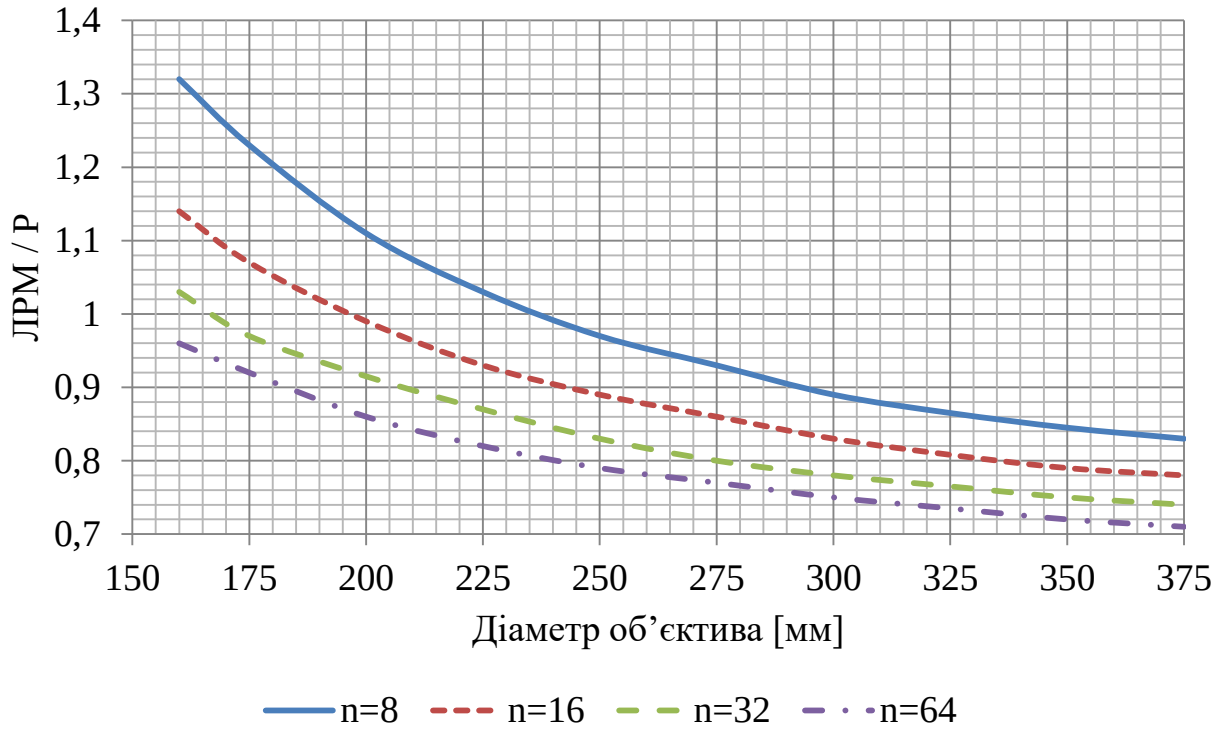


Рисунок 1.10 – Відносне розділення для панхроматичного каналу з ПЗЗ-лінійкою CCD8091

Як видно з рис.1.10, для забезпечення відношення (ЛРМ/Р) ≤ 1 необхідно, щоби D було не менше 210 мм при числі стадій n = 16. Враховуючи, що із збільшенням D різко зростають габарити та вага об'єктива, зупиняємо свій

попередній вибір на розмірі вхідного отвору об'єктива D = 226 мм, тобто відносний отвір даного об'єктива буде дорівнювати 1:10, відносний отвір – це відношення фокусної віддалі до діаметра вхідного отвору об'єктива. Чи достатньо такого діаметра для забезпечення потрібного відношення сигнал /шум, покаже світло-енергетичний розрахунок сканера.

Ширина смуги зйомки у надирі при використанні одного сенсора CCD8091 загальній кількості пікселів у рядку сканера 9216 буде дорівнювати, згідно з виразом (1.1):

$$L=9216\cdot 1{,}897 \text{ м} = 17{,}48 \text{ км}.$$

Для збільшення смуги зйомки потрібно використовувати більше сенсорів, наприклад 4, тоді смуга зйомки становитиме 69,93 км.

1.2.5. Розрахунок часових параметрів сканера з використанням фотоперетворювача CCD8091

Виходячи з розміру лінійного розміру проекції пікселя на поверхню Землі (P) та лінійної швидкості «підсупутникової» точки по поверхні Землі (V_{nm}). Визначимо тривалість рядка сканування $T_{ряд}$, приймаючи до уваги, що розмір проекції пікселя по горизонталі (поперек напрямку польоту КА) має дорівнювати проекції пікселя по вертикалі (уздовж напрямку польоту КА), тривалість рядка повинна дорівнювати:

$$T_{ряд} = P/V_{ПТ}\,. \tag{1.14}$$

Значення V_{nm} залежить від висоти польоту КА над Землею і дорівнює: [31,41]

$$V_{ПТ} = R_з^2\sqrt{\frac{g}{(R_з+H)^3}}\,, \tag{1.15}$$

де $R_з$ = 6,371·10^3 км – середній радіус Землі;

g = 9,8 м/с^2 – прискорення вільного падіння;

H – обрана висота польоту КА над поверхнею Землі.

Для Н = 490 км із (1.15) одержимо значення $V_{ПТ} \approx 7{,}069$ км/с, тоді тривалість рядка дорівнює $T_{ряд} = 1{,}897/\ 7{,}069 = 0{,}268 \cdot 10^{-3}$ с.

Загальна швидкість виводу даних із одного фотоприймача CCD8091, який має загальну кількість пікселів у рядку $N_{пікс} = 9216$ та кількість виходів $N_{вих} = 6$, дорівнює:

$$F_{заг} = N_{пікс} / T_{ряд} . \qquad (1.16)$$

При цьому частота виводу даних з кожного виходу ФП ЧЗН дорівнює:

$$F_N = F_{заг} / N_{вих} . \qquad (1.17)$$

а час зчитування одного пікселя дорівнює:

$$T_{пікс} = 1 / F_N . \qquad (1.18)$$

Із вищенаведених виразів знайдемо, що :

$F_{заг} = 9216/\ 0{,}268 \cdot 10^{-3} = 34{,}39$ МГц ; $F_N = 34{,}39 \cdot 10^6 / 6 = 5{,}73$ МГц/1 вих. ;

$$T_{пікс} = 1/\ 5{,}73 \cdot 10^6 = 174 \cdot 10^{-9} \text{ с/1 піксель.}$$

Ці розрахунки показують, що необхідне значення загальної частоти виводу даних $F_{заг} = 34{,}39$ МГц з одного ФП ЧЗН не перевищує граничного значення 120 МГц для CCD8091. Загальна швидкість виводу даних із всіх чотирьох фотоприймачів на входи блоків обробки сигналів сканера досягне 34,39 МГц ·4 = 137,56 МГц, а сумарна інтенсивність інформаційного потоку з виходу сканера при 12-ти розрядному двійковому кодуванні кожного пікселя досягне значення 137,56 МГц·12 ≈ 1,65 Гбіт/с, що забезпечується сучасними системами передачі інформації.

1.2.6. Світло-енергетичний розрахунок сканера з ФП ЧЗН типу CCD8091

Енергетична освітленість на вході фотоприймача визначається енергетичною освітленістю Землі Сонцем у заданому спектральному діапазоні з врахуванням коефіцієнта пропускання атмосфери, кута місця Сонця, альбедо об’єкта зображення і параметрів об’єктива. Величину опромінювання Землі

Сонцем на верхній границі атмосфери у всьому спектральному діапазоні $\Delta\lambda$ = 0... ∞ мкм можна визначити за допомогою наступного виразу [13]:

$$E_{o.з} = \frac{\sigma \cdot T_c^4}{4} \cdot \alpha_c^2 \quad [\text{Вт/м}^2], \tag{1.19}$$

де $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) – постійна Стефана-Больцмана;

$T_c \approx 5800$ К – абсолютна ефективна температура поверхні Сонця;

$\alpha_c = d_c / L_{c\text{-}з}$ – кутовий розмір Сонця;

$d_c \approx 1{,}39 \cdot 10^9$ м – діаметр Сонця.

Знаючи $E_{o.з}$, розрахуємо значення енергетичної освітленості Землі $E_{з.\Delta\lambda}$ на верхній границі атмосфери у заданому для сканера панхроматичному спектральному діапазоні $\Delta\lambda$ = 0,5...0,9 мкм. Для цього можна скористатися наступним виразом у приведених координатах [13]:

$$E_{з.\Delta\lambda} = E_{е.з}\left[Z(X2) - Z(X1)\right] \quad [\text{Вт/м}^2]. \tag{1.20}$$

де $X1 = \lambda 1/\lambda_{max}$; $X2 = \lambda 2/\lambda_{max}$; $\lambda 1 = 0{,}5$ мкм; $\lambda 2 = 0{,}9$ мкм;

λ_{max} = 0,5 мкм – довжина хвилі, на якій спектральна густина потоку випромінювання Сонця має максимальне значення;

$Z(X)$ – нормована функція, яка визначається площею під кривою спектральної густини потоку опромінювання у приведених координатах у інтервалі значень між $X1$ та $X2$.

Для розрахованих значень $X1$ = 1,0 та $X2$ = 1,8 із таблиці $Z = f(X)$ [26] знайдемо: $Z(X1) = 25 \cdot 10^{-2}$, $Z(X2) = 65{,}98 \cdot 10^{-2}$, тоді

$$E_{з.\Delta\lambda} = 0{,}1367[65{,}98 - 25] \cdot 10^{-2} \approx 56 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2.$$

Значення енергетичної яскравості, що відповідає значенню $E_{з.\Delta\lambda}$, дорівнює:

$$B_{з.\Delta\lambda} = E_{з.\Delta\lambda} / \pi \approx 17{,}84 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см}^2\text{·ср)}. \tag{1.21}$$

Це значення яскравості проходить через атмосферу Землі у прямому напрямку, відбивається від об'єкту зйомки з альбедо ρ (здатність поверхні відбивати та розсіювати випромінення) і повертається через атмосферу у зворотному напрямку на вхід об'єктива сканера. Таким чином, атмосфера

зменшує яскравість у $\tau^2_{ат}$ разів, де $\tau_{ат}$ – інтегральне значення коефіцієнта пропускання атмосфери у заданому спектральному діапазоні. Максимальне значення енергетичної яскравості на вході об'єктива сканера при куті Сонця над горизонтом 90˚ буде дорівнювати:[13]

$$B_{об.макс} = B_{з.\Delta\lambda} \cdot \tau^2_{ат} \cdot \rho . \qquad (1.22)$$

Коефіцієнт пропускання атмосфери залежить від погодних умов і дорівнює $\tau_{ат} = \tau_р \cdot \tau_п$, де $\tau_р$ – коефіцієнт розсіювання, що залежить від складу газу атмосфери й розмірів різних часток в атмосфері (порошин, краплин тумана, дощу і т.ін.), а $\tau_п$ – коефіцієнт поглинання, що залежить від змісту у атмосфері водяної пари, вуглекислого газу, кисню, метану й закису азоту. Кожна газова складова утворює смуги поглинання, при взаємному накладенні яких утворюється складна картина спектра поглинання атмосферних газів. Звідси зрозуміло, що розрахунок $\tau_{ат}$ складний, а головне – результати розрахунку малоефективні в реальних умовах застосування сканера. Для проведення подальших розрахунків приймаємо для панхроматичного діапазона значення $\tau_{ат.пан} \approx 0{,}8$. Оскільки максимальне значення альбедо ρ об'єктів на поверхні Землі не перевищує 0,8, то із (1.22) максимальна яскравість на вході об'єктива сканера дорівнює:

$$B_{об.макс} = 17{,}84 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}64 \cdot 0{,}8 \approx 9{,}13 \cdot 10^{-3} \text{ [Вт/(см}^2 \cdot \text{ср)]}$$

Максимальна енергетична освітленість на вході фотоприймача CCD8091 визначиться з виразу [27]:

$$E_{ФП.макс} = B_{об.макс} \cdot \pi \cdot \tau_{опт} \cdot \frac{1}{4}\left(\frac{D}{f_0'}\right)^2 . \qquad (1.23)$$

де $\tau_{опт}$ – коефіцієнт пропускання оптики об'єктива, що залежить від спектрального діапазону (для подальших розрахунків приймемо його рівним 0,8);

D – діаметр вхідної зіниці об'єктива, рівний 226 мм;

f_0' – фокусна відстань об'єктива, рівна 2260 мм.

Тоді максимальна енергетична освітленість на вході CCD8091 дорівнює:

$$E_{фп.макс} = 9{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}01 \approx 57{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ [Вт/см}^2\text{]}.$$

Значення $E_{фп.макс}$ відповідає альбедо об'єктів на Землі $\rho_{max} = 0{,}8$ та куту нахилу Сонця над горизонтом 90º. Для розрахунку відношення сигнал/шум сканера треба також знати значення низької освітленості $E_{фп.низк}$, яке звичайно нормується при альбедо $\rho = 0{,}2$ та куті нахилу Сонця над горизонтом 40º. В цих умовах $E_{фп.макс}$ зменшується приблизно в $1/(\rho \cdot \sin 40^º)$, тобто в 7,7 разів, тоді $E_{фп.низк} \approx 7{,}45 \cdot 10^{-6}$ Вт/см^2.

Для перетворення одержаних значень $E_{фп}$ у відповідні значення вихідних сигналів $U_{фп}$ фотоприймача CCD8091 при одній стадії ЧЗН скористаємося формулою: [13]

$$U_{фп}[B] = 10^6 \cdot E_{фп} \cdot R_ф \cdot T_{int}. \qquad (1.24)$$

де: $R_ф$ – інтегральна фоточутливість фотоприймача [В/(мкДж/см^2)] у заданому спектральному діапазоні;

T_{int} – час інтегрування [с];

$E_{фп}$ – освітленість на вході фотоприймача [Вт/см^2] у заданому спектральному діапазоні.

Користуючись графіком типової залежності фоточутливості CCD8091 від довжини хвилі, наведеним на рис. 1.9, знайдемо, що для спектрального діапазона $\Delta\lambda$ = 0,5...0,9 мкм типове значення $R_ф \approx 2{,}4$ В/(мкДж/см^2). Час інтегрування T_{int} дорівнює значенню часу рядка $T_{ряд} = 0{,}268 \cdot 10^{-3}$ с, розрахованому вище. Тоді із (1.22) одержимо: $U_{фп.макс}=36{,}92 \cdot 10^{-3}$ В при максимальній вхідній освітленості $E_{фп.макс}$, а $U_{фп.низк} = 4{,}79 \cdot 10^{-3}$ В при низькій вхідній освітленості $E_{фп.низ}$.

Середньоквадратичне значення відношення сигнал/шум сканера можна обчислити за формулою: [31]

$$\frac{C}{Ш} = \frac{n \cdot n_c}{\sqrt{n \cdot n_c + n_{иΣ}^2}}. \qquad (1.25)$$

де n – число задіяних стадій ЧЗН фотоприймача;

n_c – кількість сигнальних електронів, що генеруються пікселем при опроміненні ФП для n =1;

$$n_{ш\Sigma}^2 = n_{ш.ФП}^2 + n_{ш.к}^2 + n_{ш.кв}^2 .$$

$n_{ш.ФП}$ – кількість електронів, що відповідає темновому шуму ФП;

$n_{ш.к}$ – кількість електронів, що відповідає шуму каналу обробки сигнала, приведеного до входу ФП;

$n_{ш.кв}$ – кількість електронів, що відповідає шуму квантування вихідного коду сканера.

Значення n_c визначаються з виразу: [13]

$$n_c = U_{фп} / CVF . \qquad (1.26)$$

Для ЧЗН фотоприймача складова $n_{ш.ФП}$ дорівнює: [13]

$$n_{ш.ФП} = \sqrt{n \cdot n_m + n_{ш.зч.}^2} . \qquad (1.27)$$

де n_m – кількість темнових електронів у фотокомірці, яка залежить від темнового струму, температури та часу інтегрування;

$n_{ш.зч.}$ – шум зчитування ФП.

Аналіз шумових складових CCD8091 показує, що впливом складової $n \cdot n_т$ можна знехтувати із-за її малості і прийняти незалежно від числа стадій n темновий шум $n_{ш.ФП} \approx n_{ш.зч.}$, де $n_{ш.зч.}$ = 40 ē для CCD8091. Шумом квантування $n_{ш.кв}$ при 12-ти розрядному кодуванні також можна знехтувати. Значення $n_{ш.к}$ визначимо як $n_{ш.к} = U_{ш.к} / CVF$, де $U_{ш.к}$ – середньоквадратичне значення шуму, яке для сучасних CCD-процесорів, що встановлюються на вході каналу обробки, не перевищує 100 мкв. Тоді $n_{ш.к} \approx 30$ ē, а значення

$$n^2_{ш\Sigma} = 40^2 + 30^2 = 2{,}5 \cdot 10^3 \ [ē^2].$$

Вихідні дані для розрахунку С/Ш у панхроматичному діапазоні сканера зведені в табл. 1.5. Значення $U_{фп}$ та n_c тут відповідають одній стадії ЧЗН, тобто n = 1.

Значення динамічного діапазону сканера можна визначити з виразу:

$$DR = \frac{n \cdot n_c}{\sqrt{n^2_{Ш\Sigma}}}. \qquad (1.28)$$

Таблиця 1.5

Вхідні дані для розрахунку відношення сигнал/шум у панхроматичному діапазоні сканера

Рівень освітленості	$U_{фп}$ [В]	n_c [ē]	$n^2_{ш\Sigma}$ [ē ^{2}]
$E_{макс}$ (при куті Сонця 90° та альбедо ρ= 0,8)	$36{,}92 \cdot 10^{-3}$	$11{,}19 \cdot 10^{3}$	$2{,}5 \cdot 10^{3}$
$E_{низк}$ (при куті Сонця 40° та альбедо ρ= 0,2)	$4{,}79 \cdot 10^{-3}$	$1{,}45 \cdot 10^{3}$	$2{,}5 \cdot 10^{3}$

Підсумкові результати розрахунків значень С/Ш і DR сканера за формулами (1.25) та (1.26) для різних режимів роботи сканера наведені у Табл. 1.6. Із таблиці видно, що при максимальній освітленості ($E_{макс}$) гранично припустиме значення числа стадій ЧЗН дорівнює 32, тому що при n ≥ 32 значення вихідного сигналу фотоприймача ($n \cdot U_{ФП}$) перевищує типове значення напруги насичення CCD8091, рівне 1500 мВ. Відношення С/Ш при $E_{макс}$ перевищує 200 навіть при мінімальному числі стадій n = 4, а динамічний діапазон при n = 8 перевищує 1000, тобто 60 Дб, що є цілком прийнятним.

Таблиця 1.6

Результати розрахунків параметрів для різних режимів роботи сканера

Число стадій n	$U_{ФП}$[мВ]	n_c [тисяч ē]	$\sqrt{n \cdot n_c + n^2_{ш\Sigma}}$	Відношення С / Ш	Динамічий діапазон DR
Максимальна освітленість $E_{макс}$ (кут Сонця 90º, ρ=0,8) у панхроматичному спектральному діапазоні при H=490 км					
4	148	44,76	217,39	206	895
8	295	89,52	303,35	295	1790
16	591	179,04	426,08	420	3581
32	1181	358,08	600,48	596	7162

Продовження таблиці 1.6

64	2363	716,16	847,74	845	14323
96	3544	1074,2	1037,66	1035	21485
128	4726	1432,3	1197,84	1196	28646
Низька освітленість $E_{низ}$ (кут Сонця 40°, ρ=0,2) у панхроматичному спектральному діапазоні при H=490 км					
4	19,16	5,8	91,10	64	116
8	38,32	11,6	118,74	98	232
16	76,64	23,2	160,31	145	464
32	153,28	46,4	221,13	210	928
64	306,56	92,8	308,71	301	1856
96	459,84	139,2	376,43	370	2784
128	613,12	185,6	433,70	428	3712

При низькій освітленості ($E_{низк}$) значення С/Ш = 64 при n=4 і перевищує 100 тільки при числі стадій $n \geq 8$. На практиці існуючі сканери на основі фотоприймачів CCD8091 та порівняно невеликого об'єктива (діаметр вхідної зіниці D = 226 мм), може забезпечити проекцію пікселя на Землі P=1,9 м при прийнятних значеннях С/Ш. Спробуємо оцінити виграш у розмірах діаметра об’єктива, який ми одержуємо від застосування у цьому сканері ФП ЧЗН CCD8091 замість звичайної ПЗЗ-лінійки. Оскільки ПЗЗ-лінійок з розміром пікселя 8,75 мкм не існує, уявимо собі, що замість CCD8091 у сканер встановлено віртуальну ПЗЗ-лінійку, у якої всі параметри співпадають з параметрами CCD8091, крім, звичайно, наявності ЧЗН. Тоді для отримання такого ж значення С/Ш, яке відповідає числу стадій n у CCD8091, необхідно було би підняти рівень вихідного сигналу ПЗЗ-лінійки у n разів шляхом збільшення діаметра об'єктива (при тій же фокусній відстані) у $\sqrt{n}$ разів (див. вирази (1.23), (1.24)). В той же час відомо, що ПЗЗ-лінійки за рахунок більш

високої квантової ефективності зазвичай мають інтегральне значення фоточутливості R_ϕ у K разів більше, ніж у фотоприймачах з ЧЗН, тому реально потрібно збільшити діаметр об'єктива у $\sqrt{n / K}$ разів. Для більшості сучасних ПЗЗ-лінійок коефіцієнт $K \approx 2...3$, а значення n на практиці рідко перевищує 16 із-за проблем зі розмиттям зображення, викликаним обертанням Землі. На основі проведених розрахунків робимо висновок, що застосування $n = 16$ у сканері фотоприймача (ФП) з ЧЗН типу CCD8091 замість звичайної ПЗЗ-лінійки без ЧЗН дозволяє зменшити діаметр об'єктива приблизно у 2,3...2,8 рази, що є дуже важливим для сканерів малих космічних апаратів.

1.3. Шляхи підвищення роздільної здатності зображень

В даний час є вимоги до сканерів КА, які протирічать точності оцінки положення наземних об'єктів, високої роздільної здатності зображення одночасно з великим полем зору цифрової камери. Ці вимоги поки не дозволяють отримувати необхідні характеристики космічних знімків. Можливими шляхами підвищення роздільної здатності цифрових камер для космічної зйомки є:

- збільшення фокусної відстані об’єктива камери;
- зменшення розміру пікселя ПЗЗ-лінійки, або матриці;
- використання інтерполяції;
- застосування субпіксельної технології зйомки.

Збільшення фокусної відстані об’єктива камери. Використання дорогих довгофокусних об'єктивів з великим діаметром апертури дозволяє ефективно підвищити роздільну здатність, але при цьому зменшується кут огляду наприклад для супутника Ikonos-2 ширина смуги захоплення становить всього 11 кілометрів при роздільній здатності 0,82 метра. Тому, існує суперечлива вимога підвищення роздільної здатності при збереженні широкої смуги огляду. Проблема підвищення роздільної здатності для супутникових систем ДЗЗ

особливо гостра для інфрачервоного-теплового та НВЧ діапазонів електромагнітних хвиль (ЕМХ). [12, 87]

Зменшення розміру пікселя та збільшення кількості пікселів давача зображення. Покращення роздільної здатності зображень шляхом збільшення кількості пікселів в ПЗЗ-давачів зазвичай веде до зменшення їх розміру, на що накладаються обмеження, зумовлені технологічними факторами виготовлення ПЗЗ-давачів [87]. З іншого боку, це веде до ускладнення взаємозв'язку між давачем і пристроєм формування, що вимагає збільшення тактової частоти опитування ПЗЗ-матриці, а також призводить до значного навантаження бортового процесора. Недоліками цього методу є також збільшення рівня шумів, зменшення світлочутливості. При збільшенні роздільної здатності в 2 рази, площа пікселя зменшується в 4 рази. Зменшення розмірів пікселя є технологічно обмеженим.

Істотним недоліком методу інтерполяції, описаного в [25], є наявність характерних артефактів у інтерпольованому зображенні, що погіршують точність масштабування в області різких змін яскравості. Типові артефакти включають в себе появу ефекту зубчастого краю на похилих лініях, розмиття через обмеження при відновленні високочастотних складових інтерпольованих даних, і ефекту Гіббса - виникнення паразитних хвилеподібних коливань інтерполяційної функції, відсутніх у інтерпольованому зображенні. Основним недоліком інтерполяції є неможливість точного відновлення інформації.[32]

Субпіксельне формування зображень дозволяє отримувати цифрове зображення більш високої роздільної здатності без зміни оптичної системи пристрою формування. Для реалізації алгоритму необхідно наявність декількох зображень одного об'єкта, зсунутих один відносно одного на частину пікселя [5, 48, 50, 67, 70, 73, 74, 74, 79, 83, 88, 92].

Субпіксельна обробка зображень дає поліпшення просторової роздільної здатності з тим же давачем без зміни геометрії пікселя.

Перевагами субпіксельної обробки зображень є те, що вона дозволяє підвищити просторову роздільну здатність без зміни оптичного давача на давач з більшою кількістю пікселів і зменшення фокусної відстані оптичної системи. Це ефективний підхід для зменшення розміру оптичної системи. Використання субпіксельної технології зйомки дозволяє підвищити роздільну здатність приладу, або, в разі збереження заданої роздільної здатності, скоротити фокусну відстань системи і зменшити вагу та об'єм оптичної системи, що є дуже важливим для систем моніторингу [100]. Недоліком є значне навантаження бортового процесора, пам’яті системи [87].

Серію цифрових зображень з низькою роздільною здатністю, можна отримати:

а) при субпіксельному скануванні оптичного зображення лінійкою (матрицею) детекторів [3],

б) з використанням екрануючої маски з діафрагмами, встановленої перед лінійкою (матрицею) детекторів, і розфокусуванню оптичного зображення на лінійці (матриці) детекторів [2],

в) при різних значеннях ступеня розфокусуфання оптичного зображення без використання екрануючої маски [2].

Висновки до розділу 1

В розділі проведено аналіз методів підвищення роздільної здатності зображень. Розглянуто та вказано переваги та недоліки кожного методу субпіксельної обробки зображень.

1. Проведено оцінку роздільної здатності елементів зображення в сканерах ДЗЗ, та аргументовано, що для підвищення роздільної здатності, завадостійкості і чутливості та зменшення масо-габаритних характеристик, є використання субпіксельної обробки зображень з використанням у якості давачів зображення пристроїв з часовою затримкою та накопиченням (ЧЗН).

2. Проаналізовано особливості застосування ПЗЗ-лінійок для сканерів дистанційного зондування Землі і відзначено, що у всіх сучасних сканерах з

просторовим розділенням менше 2 м застосовані ФП ЧЗН, які мають розмір пікселів від 7х7 мкм^2 до 13х13 мкм^2 та число стадій ЧЗН від 8 до 64.

3. Сформульовано критерії для вибору ФП ЧЗН для сканерів високої роздільної здатності. ФП ЧЗН повинен мати максимальну кількість пікселів у рядку, причому розміри пікселів для зменшення фокусної відстані об'єктива повинні бути мінімальні.

4. Показано, що для сканерів малих КА для зменшення габаритів та ваги необхідно до мінімуму зменшувати діаметр вхідного отвору об'єктива з одночасним врахуванням просторової та енергетичної роздільних здатностей, які забезпечує сканер з цим об'єктивом та обраним типом ФП ЧЗН при різних значеннях числа стадій ЧЗН.

5. Проаналізовані параметри сучасних ФП ЧЗН, які існують на світовому ринку, та показана перспективність використання ФП ЧЗН типу CCD8091 у сканерах з високою роздільною здатністю, встановлених на космічних апаратах. Доведено, що за своєю швидкодією CCD8091 може забезпечити просторове розділення сканера на рівні $P_{MIN} \approx 0{,}54$ м, для висоти орбіти 490 км.

6. Проведено детальний аналіз структури та характеристик ФП ЧЗН типу CCD8091 з точки зору застосування цього ФП у сканері космічного базування.

7. Розроблено методику розрахунку часових та світло-енергетичних параметрів сканера, у якому застосовуються ФП ЧЗН**.** За результатами розрахунку доведено, що сканер, виконаний на основі фотоприймачів CCD8091 та порівняно невеликого об'єктива (діаметр вхідної зіниці D = 226 мм, відносний отвір 1:10), може забезпечити розмір проекції пікселя на Землі P=1,9 м при прийнятних значеннях відношення сигнал /шум.

8. Доведено, що застосування у сканері ФП ЧЗН типу CCD8091 замість звичайної ПЗЗ-лінійки без ЧЗН дозволяє зменшити діаметр об'єктива приблизно у 2,3...2,8 рази, що є дуже важливим для сканерів малих КА.

9. Проаналізовано шляхи підвищення роздільної здатності зображень. Вказано їх переваги та недоліки. Шляхами підвищення роздільної здатності є:

- збільшення фокусної відстані об’єктива камери;
- зменшення розміру пікселя та збільшення кількості пікселів давача зображення;
- застосування субпіксельної обробки зображень.

10. Розглянуто принцип субпіксельного формування зображень.

На основі аналізу основних властивостей сканерів систем ДЗЗ, та їх основних характеристик можна зробити висновок, що одним із напрямків підвищення ефективності, а саме підвищення роздільної здатності, підвищення завадостійкості і чутливості та зменшення масо-габаритних характеристик, є використання у якості давачів зображення пристроїв з часовою затримкою та накопиченням заряду (ЧЗН) та методу субпіксельної обробки зображень.

РОЗДІЛ 2
ОЦІНКА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ТА РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЗОБРАЖЕНЬ, ПОБУДОВАНИХ СКАНЕРОМ СИСТЕМ ДЗЗ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ

2.1. Основні фактори впливу на якість та роздільну здатність зображень, сформованих сканером системи ДЗЗ видимого діапазону

Розглянемо основні фактори, що впливають на якість зображення, одержаного від СВРЗ з фотоприймачем CCD8091 який рекомендовано використовувати для побудови сканера українського супутника СІЧ-2М. Припустимо, що у якості тест-об'єкту на Землі використовується міра, що складається із світлих та темних смуг з шириною P. Якість зображення, одержаного від сканера, прийнято оцінювати за допомогою модуляційної передавальної функції (МПФ), тобто залежністю контрасту зображення періодичної міри від просторової частоти. На якість, з якою сканер зможе побудувати зображення цього тест-об'єкту, впливають наступні фактори: [19,20,26,40,41]

1) Контраст тест-об'єкту на Землі – K_O, який залежить від коефіцієнта відбиття об'єкту спостереження (альбедо) та коефіцієнта відбиття рівномірного фона земної поверхні;

2) МПФ атмосфери – $M_{ATM}\left(\nu_x,\nu_y\right)$, де ν_x,ν_y – просторова частота оптичного випромінювання сигналу у напрямках x та y відповідно. Атмосфера змінює параметри випромінювання від об'єкту за рахунок поглинання, розсіювання світла та турбулентності атмосфери. При проведенні зйомки через

шар атмосфери відбувається розмивання зображення предметів у турбулентних шарах, величину якого визначає МПФ атмосфери;

3) МПФ об'єктиву сканера – $M_{ОБ}(\nu_x,\nu_y)$, яка залежить від таких параметрів об'єктива, як дифракція та аберації;

4) МПФ ПЗЗ-лінійки – $M_{ПЗЗ}(\nu_x,\nu_y)$. Оскільки ПЗЗ-фотоприймач є просторовою системою, то ця система буде передавати зображення через обмежену кількість дискретних точок, при цьому максимальна просторова частота ν_H, яка може бути однозначно перетворена і передана ПЗЗ-фотоприймачем, це частота Найквіста, при якій кожний піксель ПЗЗ-фотоприймача відповідає максимуму або мінімуму зображення. Частота Найквіста зв'язана з розміром пікселя співвідношенням $\nu_H = 1/2 \cdot a$ [41] , де a – розмір пікселя у напрямку довжини лінійки;

5) МПФ фазового положення смуги «тест-об'єкту» – $M_{Ф}(\nu_x,\ a,\ \nu_y,b)$. Положення зображення об'єкту може бути довільним відносно центру пікселя і попасти не на один, а на два сусідних пікселя, що приводить до падіння контрасту зображення [20];

6) Функція зниження МПФ у напрямку польоту КА за рахунок “зсуву” зображення – $M_{ЗС}(\nu_x,\ a')$. За рахунок руху КА навколо Землі сканер рядок за рядком будує зображення земної поверхні. Рух під час експозиції сигналу спричиняє розмивання зображення, і, отже, викликає зменшення контрасту зображення та роздільної здатності сканера вздовж напрямку польоту[26];

7) Функція зниження МПФ за рахунок нестабільності положення осі КА під час експозиції – $M_{\omega}\left(\nu_x,\nu_y\right)$. За рахунок цієї нестабільності на протязі часу експозиції t_E відбувається зміщення зображення у фокальній площині об'єктиву сканера на величину: $\Delta X\left(\omega_X\right) = f_O' \cdot tg(\omega_X \cdot t_E)$; $\Delta Y\left(\omega_Y\right) = f_O' \cdot tg(\omega_Y \cdot t_E)$, де ω_X і ω_Y - кутові швидкості зміщення осі КА у напрямку польоту і, відповідно, перпендикулярно напрямку польоту (кут. град. /сек), , а f_0' – фокусна відстань

об'єктиву. Як правило, значення кутових швидкостей ω_X, ω_Y зміщення осі КА знаходяться у межах 0,001...0.005 °/с, що при застосуванні у сканері звичайних ПЗЗ-лінійок (без часової затримки та накопичення) призводить до незначного зміщення зображення у фокальній площині за час експонування, а отже, і до незначного зниження МПФ. Але при роботі сканера з ЧЗН-фотоприймачем відбувається підсумовування сигналів від суміжних пікселів різних лінійок фотоприймача. При цьому середня величина зсуву зображення у фокальній площині при накопиченні сигналу з *n* лінійок зростає у *n* раз, що призводить до суттєвого розмивання зображень об'єктів і до накладання зображень суміжних ділянок поверхні одне на одного[19].

8) Функція зниження МПФ за рахунок обертання Землі під час експозиції - $M_{ОБЗ}\left(\nu_y, \alpha\right)$. Оскільки площина кругових сонячних орбіт КА проходить поблизу полюсів Землі, то за час експозиції відбувається зміщення підсупутникової точки вздовж рядка ПЗЗ-лінійки за рахунок обертання Землі навколо своєї осі. Швидкість зміщення підсупутникової точки залежить від широти α ділянки, де виконується зйомка, і визначається виразом:[40]

$$V_{ОБЗ} = \frac{2\pi R_З \cdot \cos\alpha}{24 \cdot 3600} \ \left(км / сек\right), \qquad (2.1)$$

де $R_З$ [км] – радіус Землі.

У відповідності з величиною зміщення підсупутникової точки зміщується і зображення у фокальній площині об'єктиву, а при застосуванні у сканері ЧЗН-фотоприймача це зміщення також зростає у *n* раз , де *n* – кількість лінійок ЧЗН ФП, задіяних для накопичення сигналу. Це також приводить до розмивання зображення [26];

9) Функція зниження МПФ за рахунок нестабільності висоти орбіти КА під час експозиції – $M_{\Delta H}\left(\nu_X\right)$. Орбіта КА не має точної кругової форми з висотою *H* над Землею, а являє собою рух «по дорозі з вибоїнами». При цьому у залежності від точки орбіти над ділянкою Землі, над якою пролітає КА,

висота орбіти може змінюватися у межах приблизно $H\pm20$ км. Для висоти H у сканері встановлюється певна частота зчитування рядків, яка відповідає часу проходження підсупутниковою точкою відстані, рівної ширині смуги на поверхні Землі – A (м). Але при зміні висоти КА змінюється величина проекції пікселя на Землі і ширина смуги на поверхні Землі, а також швидкість руху підсупутникової точки. При фіксованому значенні часу експозиції для висоти H (а, відповідно, і частоти зчитування рядків) це приводить до «наповзання» зображень двох сусідніх рядків один на одного і падіння МПФ. Особливо це відчувається при збільшенні кількості n лінійок ЧЗН ФП, задіяних для накопичення сигналу [26].

Оскільки сканер можна розглядати як лінійну інваріантну систему, то результуюча МПФ системи $M_{\Sigma}(\nu_x,\nu_y)$ залежить від усіх цих факторів і дорівнює добутку перерахованих вище функцій:

– у напрямку польоту КА

$$M_{\Sigma}(\nu_x)=K_O M_{ОБ}(\nu_x)M_{ATM}\left(\nu_x\right)M_{ПЗЗ}(\nu_x)M_{Ф}(\nu_x,a)M_{ЗС}(\nu_x,a')M_{\omega}\left(\nu_x\right)M_{\Delta H}\left(\nu_x\right),$$

– у напрямку, перпендикулярному польоту КА

$$M_{\Sigma}(\nu_y)=K_O M_{ОБ}(\nu_y)M_{ATM}\left(\nu_y\right)M_{ПЗЗ}(\nu_y)M_{Ф}(\nu_y,b)M_{\omega}\left(\nu_y\right)M_{\Delta H}\left(\nu_y\right)M_{ОБЗ}\left(\nu_y,\alpha\right).$$

Перші п'ять вищеперерахованих факторів, тобто K_O, $M_{ОБ}(\nu_x,\nu_y)$, $M_{ATM}\left(\nu_x,\nu_y\right)$, $M_{ПЗЗ}(\nu_x,\nu_y)$ та не зв'язані зі стабілізацією КА, їх вплив на якість зображення тест-об'єкту достатньо докладно проаналізований в багатьох роботах, наприклад, у [85]. Тому далі проаналізуємо вплив на якість та роздільну здатність зображення тільки решти чотирьох факторів (див. п. 6...9), які зв'язані безпосередньо з рухом КА, нестабільністю положення його осі, положенням КА над певною широтою Землі та нестабільністю висоти КА над поверхнею Землі. А оскільки вплив цих факторів на розмивання зображення збільшується при зростанні кількості рядків накопичення у ЧЗН-фотоприймачі, то можна зробити висновок, що при проектуванні СВРЗ необхідно шукати

компроміс між вимогами до параметрів стабілізації КА, на якому встановлено СВРЗ, та максимально-допустимою кількістю задіяних рядків накопичення у застосованому нами ЧЗН-фотоприймачі CCD8091, від якої залежить забезпечення заданого для сканера відношення сигнал/шум.

2.2. Аналіз впливу факторів на якість та роздільну здатність зображень

2.2.1. Вплив параметрів стабілізації КА на допустиме число стадій накопичення CCD8091 у сканері високої роздільної здатності

Вплив обертання Землі та зміни висоти орбіти КА на якість зображення, одержаного від сканера з ЧЗН-фотоприймачем, досліджувався у деяких джерелах [19, 55, 100]. Однак у цих джерелах відсутній аналіз впливу параметрів стабілізації КА на допустиме число стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі при проведенні зйомки на конкретній ділянці земної поверхні. Виходячи з цього, зробимо такий аналіз та розрахуємо допустиме число стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі типу CCD8091, який забезпечував би величину проекції пікселя на Землі 1,9м з висоти орбіти КА 490км (або, відповідно, 2,6м з висоти 668км) при значеннях параметрів стабілізації КА, досягнутих на сучасних вітчизняних супутниках, а також сформулюємо вимоги до параметрів стабілізації КА при використанні максимально можливого числа стадій накопичення у CCD8091. Нехай космічний апарат з встановленим на ньому сканером високої роздільної здатності обертається навколо Землі по круговій орбіті на висоті H відносно поверхні Землі. Тоді орбітальна кругова лінійна швидкість переміщення КА по його орбіті згідно [41] буде

$V_{КА} = \sqrt{\frac{\mu}{R_З + H}}$, а величина швидкості лінійного переміщення підсупутникової точки по поверхні Землі $V_{пт}$ відповідно дорівнюватиме:

$$V_{пт} = \frac{R_З \cdot \sqrt{\mu}}{\left(R_З + H\right)^{3/2}}, \tag{2.2}$$

де $R_З$ =6371 км – радіус Землі;

H [м] – висота орбіти КА відносно поверхні Землі;

μ =3,98602·10^5 км^3/с^2 – гравітаційна постійна Землі. [41]

Звідси виходить, що швидкість переміщення зображення підсупутникової точки $V_{з.пт}$ у полі зору об'єктиву СВРЗ, що має фокусну відстань f_0', буде визначатися залежністю: [41]

$$V_{з.пт} = \frac{f_0' \cdot R_З \cdot \sqrt{\mu}}{H \cdot \left(R_З + H\right)^{3/2}}. \tag{2.3}$$

Вказане переміщення не є єдиним. Крім цього переміщення, у полі зору об’єктиву СВРЗ буде мати місце також лінійне переміщення зображення точок місцевості на поверхні Землі, яке викликане обертанням Землі навколо своєї осі. При цьому (див. рис. 2.1), якщо нахилення орбіти супутника γ=0, де γ – двогранний кут, утворений площиною орбіти КА і площиною екватору Землі, що відраховується від площини екватору до площини орбіти КА проти ходу часової стрілки для спостерігача, який знаходиться у точці вузла сходження x, то напрямки швидкостей переміщення підсупутникової точки по поверхні Землі та переміщення самої Землі внаслідок її обертання будуть або співпадати, або будуть протилежні за напрямком (у залежності від напрямку орбітального руху КА навколо Землі).

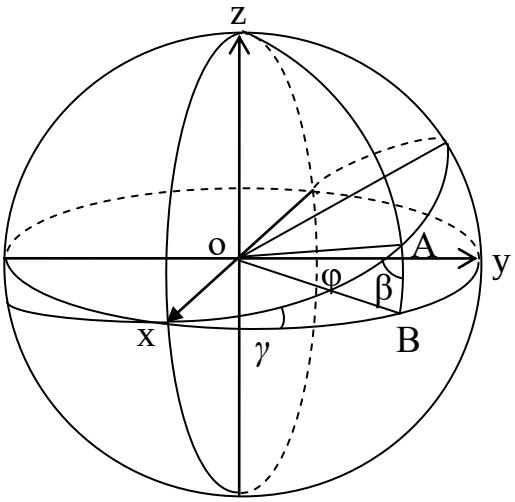


Рисунок 2.1 – Модель для розрахунку параметрів орбіти КА над поверхнею Землі

Іншими словами, вектори вказаних швидкостей будуть орієнтовані вздовж однієї й тієї ж прямої, і, отже, їх результуюча буде направлена вздовж тієї ж самої прямої, а її величина буде дорівнювати сумі чи різниці модулів вказаних швидкостей. Якщо ж нахилення орбіти $\gamma \neq 0$, то вектор швидкості переміщення підсупутникової точки та вектор швидкості переміщення точок на Землі, викликаний обертанням Землі, утворюють між собою деякий (у загальному випадку – ненульовий) кут, в результаті чого напрямок результуючої швидкості переміщення зображення поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ не буде співпадати з напрямком польоту КА, а, отже, зображення одної і тої ж точки Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ не буде переміщуватися вздовж одного і того ж "стовбця" ПЗЗ-матриці у фотоприймачі CCD8091 .

Щоби визначити величину кута між напрямком польоту КА і напрямком результуючого переміщення зображення будь-якої точки Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ, звернемося до рис. 2.1, на якому показані:

- площина OxBy – площина екватору Землі;
- площина OxA – площина орбіти КА;
- $\angle AxB = \gamma$ – величина нахилення орбіти КА;

− дуга ∪xA=φ – аргумент широти, який чисельно дорівнює величині центрального кута ∠xOA, що відраховується у площині орбіти в напрямку руху КА від вузла сходження x до радіуса-вектора OA КА, що рухається, при умові, що КА віддаляється від точки x;

− ∠xAB=β – змінний у часі кут між площиною орбіти КА OxA і площиною меридіана zAB в момент знаходження КА у точці А його орбіти.

Розглядаючи прямокутний сферичний трикутник xAB на рис. 2.1, у якого ∠AxB=i, ∪xA=φ та ∠ABx=90°, у відповідності з формулами сферичної тригонометрії [8] можна записати, що :

$$\tan\angle xAB=\frac{\operatorname{ctg}\angle AxB}{\cos x\breve{A}},\qquad \sin A\breve{B}=\sin x\breve{A}\cdot\sin\angle AxB, \tag{2.4}$$

Звідки, підставляючи в ці формули значення ∪xA та ∠AxB , одержимо:

$$\tan\beta=\frac{ctg\gamma}{\cos\varphi}, \tag{2.5}$$

$$\sin A\breve{B}=\sin\gamma\cdot\sin\varphi, \tag{2.6}$$

де φ – центральний кут xOA, що відповідає дузі ∪xA.

Знаючи тепер величину дуги $\cup AB$ із (2.6), визначимо величину лінійної швидкості $V_З$ точки на поверхні Землі, розташованій на широті, рівній величині дуги $\cup AB$:

$$V_З=R_З\cdot\omega_З\cdot\cos A\breve{B}\;=\;R_З\cdot\omega_З\cdot\sqrt{1-\sin^2\gamma\cdot\sin^2\varphi}, \tag{2.7}$$

де $\omega_З$=15″/с – кутова швидкість обертання Землі.

На основі залежності (2.7) швидкість переміщення зображення точки поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ, викликана обертанням Землі, дорівнює:

$$V_{З.З}=\frac{f_0'\cdot R_З}{H}\cdot\omega_З\cdot\sqrt{1-\sin^2\gamma\cdot\sin^2\varphi}. \tag{2.8}$$

Таким чином, нами визначені величини лінійних швидкостей переміщення зображення точки поверхні Землі, викликаних переміщенням КА відносно Землі (2.3) та обертанням Землі (2.8). Приймаючи до уваги, що кут між векторами вказаних швидкостей, як це видно з рис. 2.1, дорівнює 90°+β, на основі залежностей (2.2), (2.3) та (2.8) визначимо кут $\Delta\psi$ між напрямком польоту КА і вектором результуючої швидкості переміщення зображення точки поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ:

$$\Delta\psi = arctg \frac{\omega_з \cdot \sin\gamma \cdot \cos\varphi}{\frac{\sqrt{\mu}}{(R_з + H)^{3/2}} - \omega_з \cdot cos\gamma}. \qquad (2.9)$$

Наявність ненульового значення величини $\Delta\psi$, яка визначається залежністю (2.9), приведе до того, що напрямок руху зображення деякої довільно вибраної точки поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ буде неперпендикулярним до поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача CCD8091, що в свою чергу приведе у процесі накопичення інформації до поступового "зповзання" зображення вибраної нами точки з першого "стовбця" ЧЗН-фотоприймача.

Крім розглянутої нами причини, на величину неперпендикулярності напрямку руху зображення поверхні Землі відносно поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача у полі зору об'єктиву СВРЗ будуть впливати також:

– ψ_1 – інструментальна похибка СВРЗ із-за непаралельності встановлення поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача CCD8091 відносно осі Ох приладової системи координат СВРЗ;

– ψ_2 – інструментальна похибка із-за неперпендикулярності лінії, що з'єднує центри фіксуючих штирів під встановлення СВРЗ на платформі КА, відносно осі Ох КА;

– ψ_3 – систематична складова похибки орієнтації КА відносно орбітальної пересувної системи координат;

– ψ_y – динамічна складова похибки орієнтації КА відносно орбітальної пересувної системи координат навколо осі, паралельної радіус-вектору КА, що рухається.

Перші дві із вказаних похибок (ψ_1 та ψ_2) є інструментальними, другі дві ($\psi_з$ та ψ_y) – експлуатаційними похибками, і всі вони разом приводять до розвороту і появі неперпендикулярності поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача CCD8091 відносно напрямку польоту КА. Таким чином, максимальна можлива величина неперпендикулярності поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача відносно напрямку переміщення зображення деякої точки місцевості у полі зору об'єктиву СВРЗ буде:

$$\psi_\Sigma = \Delta\psi + \psi_1 + \psi_2 + + \psi_3 + + \psi_y . \qquad (2.10)$$

Тут ψ_1, ψ_2 та $\psi_з$ – випадкові систематичні складові похибки, а ψ_y – випадкова і залежна від часу складова похибки величини ψ_Σ . При цьому складову ψ_y можна представити у наступному вигляді [41]:

$$\psi_y = \psi_{y0} \cdot \sin\frac{2\pi}{T_y} \cdot t , \qquad (2.11)$$

де ψ_{y0} – величина динамічних кутових коливань КА навколо осі Оу,

T_y – період динамічних випадкових кутових коливань КА навколо осі Оу орбітальної пересувної системи координат (вісь Оу паралельна радіус-вектору, що з'єднує центр Землі і центр мас КА) ;

t – поточний час, а у складовій $\Delta\psi$ функцією часу є аргумент широти φ (див. залежність (2.9)).

Зробимо числову оцінку екстремальних значень величини ψ_Σ для висот орбіти Н=490 км та Н=668км з врахуванням значень $\omega_з$=15″/с, γ=98°, φ=0° (та φ=180°), μ=3,98602·10^5 км^3/с^2, $R_з$=6371 км. При розрахунках будемо користуватися реальними значеннями складових похибок орієнтації,

супутників «EgyptSat-1» та «Січ-2», а саме: $\psi_1=\psi_2=\pm 15'$, $\psi_з= \pm 0{,}2^o = \pm 12'$, $\psi_у=\pm 5'$ [43].

У результаті розрахунків ψ_Σ за виразом (2.10) одержимо для випадку, коли КА знаходиться в районі екватору: при H=490 км $\psi_\Sigma=\pm 275{,}5'$, при H=668км $\psi_\Sigma=\pm 267'$

Для випадку, коли КА знаходиться у приполярній зоні, тобто коли φ=90° (чи φ=270°), при любій висоті орбіти Δψ=0. Отже, для цього випадку $\psi_\Sigma=\pm 47'$.

Знаючи тепер величину неперпендикулярності поздовжньої осі рядка ЧЗН- фотоприймача відносно напрямку переміщення зображення поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ, можна визначити максимально-допустиму величину кількості рядків (тобто число стадій ЧЗН у ФП CCD8091), які можна використати для накопичення інформації. Але перед тим, як проводити обчислення, необхідно врахувати ще можливе зміщення зображення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ, викликане наявністю динамічних кутових коливань КА навколо осі Оx, паралельної напрямку руху КА, які за аналогією з виразом (2.10) можна представити у вигляді:

$$\psi_x = \psi_{x0} \cdot \sin \frac{2\pi}{T_x} \cdot t, \qquad (2.12)$$

де ψ_{x0} – величина динамічних кутових коливань КА навколо осі Оx;

T_x – період динамічних кутових коливань КА навколо осі Оx.

Якщо у вихідних даних на розробку СВРЗ замість амплітуди ψ_{x0} і періоду T_x динамічних кутових коливань КА задано амплітуду ψ_{x0} та кутову швидкість коливань ω_{x0}, то для визначення періоду T_x, достатньо продиференціювати вираз (2.12) по часу t. У результаті диференціювання одержимо, що величина кутової швидкості

$$\dot{\psi}_{x0} = \frac{2\pi}{T_x} \cdot \psi_{x0} \cdot cos \frac{2\pi}{T_x} \cdot t,$$

а її амплітудне значення $\omega_{x0} = \frac{2\pi}{T_x} \cdot \psi_{x0}$, звідки $T_x = 2\pi \cdot \frac{\psi_{x0}}{\omega_{x0}}$. (2.13)

За інформацією від КБ «Південне» типове значення $\psi_{x0} = 5'$ (кут. хвил.), а кутова швидкість коливань ω_{x0}=0,002 °/с. Підставляючи у (2.13) ці значення одержимо, що $T_x = 2\pi \cdot \frac{5'}{0{,}12\,'/c} = 261{,}8c$. На основі залежностей (2.12) та (2.13) можна визначити зміщення ΔL зображення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ в напрямку вздовж рядку ЧЗН-фотоприймача, яке викликане наявністю динамічних кутових коливань КА навколо осі Оx за час накопичення $n \cdot t_н$, де n – кількість лінійок (рядків) ЧЗН-фотоприймача CCD8091, що використовуються для накопичення інформації, а $t_н$ – час накопичення інформації на одній лінійці:

$$\Delta L = f_0' \frac{\psi_{x0}}{\rho} \cdot \sin \frac{\omega_{x0} \cdot n \cdot t_н}{\psi_{x0}} \cdot \rho,$$

де f_0' = 2260 мм – фокусна відстань об'єктива СВРЗ, розрахована вище;

ρ=3438′ – кількість хвилин у одному радіані (при цьому ψ_Σ і ω_{x0} повинні бути виражені, відповідно, в кутових хвилинах і у кутових хвилинах за секунду часу), або, враховуючи, що кут $\frac{\omega_{x0} \cdot n \cdot t_н}{\psi_{x0}} \cdot \rho$ є малою величиною, остаточно можна записати:

$$\Delta L = n \cdot f_0' \cdot \frac{\omega_{x0}}{\rho} \cdot t_н. \quad (2.14)$$

Отже, якщо прийняти, що величина лінійного зміщення зображення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ у напрямку вздовж рядка ЧЗН-фотоприймача за час накопичення $n \cdot t_н$ може бути допущена не більше деякої k-тої долі розміру пікселя, де $0 \le |k| \le 1$, то максимально-допустима кількість рядків n, які можуть бути використані нами для накопичення інформації, може бути визначена із наступної нерівності:

$$\frac{(k\cdot a)\ -\ \Delta L}{n\cdot b}\geq\frac{\psi_{\Sigma}}{\rho},\qquad \text{тобто}\qquad \frac{(k\cdot a)\ -\ n\cdot f_0'\cdot\frac{\omega_{x0}}{\rho}\cdot t_н}{n\cdot b}\geq\frac{\psi_{\Sigma}}{\rho},$$

звідки максимально-допустима кількість рядків, які можуть бути використані для накопичення інформації

$$n\ \leq\frac{k\cdot a}{\left(b\cdot\psi_{\Sigma}\right)+\left(f_0'\cdot\omega_{x0}\cdot t_н\right)}\cdot\ \rho, \tag{2.15}$$

де a – довжина пікселя CCD8091 (розмір пікселя у напрямку рядка);

b – ширина пікселя CCD8091 (розмір пікселя у напрямку поперек рядка).

Щоби зробити числову оцінку величини n, визначимо час накопичення $t_н$, як частку від ділення величини проекції пікселя P на Землі на величину лінійної швидкості $V_{\sum}$ переміщення підстилаючої поверхні Землі. При цьому величина проекції P пікселя на Землі може бути розрахована із залежності [41]:

$$P=\frac{b\cdot H}{f_0'}, \tag{2.16}$$

а величина лінійної швидкості $V_{\sum}$ переміщення підстилаючої поверхні Землі – як векторна сума складових:

– швидкості переміщення підсупутникової точки V_{nm} по поверхні Землі, що визначається залежністю (2.2);

– швидкості переміщення $V_з$ точок на Землі, яка викликана обертанням Землі і визначається залежністю (2.6);

– швидкості переміщення V_z точки по поверхні Землі, яка викликана наявністю динамічних кутових коливань КА навколо осі, перпендикулярної площині орбіти КА. Вказана швидкість може бути виражена залежністю: [41]

$$V_{\ z}=\frac{2\pi\cdot H}{T_z}\cdot\frac{\psi_{z0}}{\rho}\cdot\cos\frac{2\pi}{T_z}\cdot t, \tag{2.17}$$

де ψ_{z0} – величина динамічних кутових коливань КА навколо осі, перпендикулярної площині орбіти КА;

T_z – період динамічних кутових коливань КА навколо цієї ж осі.

Якщо в вихідних даних задано ψ_{z0} і кутову швидкість коливань ω_{z0}, то величину періоду T_z аналогічно залежності (2.13) можна розрахувати за формулою:

$$T_z = 2\pi \cdot \frac{\psi_{z0}}{\omega_{z0}}. \tag{2.18}$$

Таким чином, на основі залежностей (2.2), (2.7) і (2.17) та враховуючи, що вектори $\bar{V}_{nm}$ і $\bar{V}_z$ колінеарні, а кут між векторами $\bar{V}_{nm}$ і $\bar{V}_з$ дорівнює 90°+β, можна визначити величину результуючої лінійної швидкості V_Σ переміщення підстилаючої поверхні Землі, яка буде дорівнювати:

$$V_\Sigma = [(V_{nm}+V_z)^2 - 2(V_{nm}+ V_z) \cdot V_з \cdot sin\beta + V_з^2]^{1/2},$$

а після підстановки в цей вираз значень V_{nm}, V_z та $V_з$ із (2.2), (2.17), (2.8) остаточно будемо мати:

$$V_\Sigma = \left[\left(\frac{R_з\sqrt{\mu}}{(R_з+H)^{3/2}} + \frac{2\pi \cdot H}{T_z} \cdot \frac{\psi_{z0}}{\rho} \cdot \cos\frac{2\pi}{T_z} \cdot t \right)^2 - \right.$$
$$\left. - 2 \cdot \left(\frac{R_з\sqrt{\mu_0}}{(R_з+H)^{3/2}} + 2\frac{\pi \cdot H}{T_z} \cdot \frac{\psi_{z0}}{\rho} \cdot \cos\frac{2\pi}{T_z} \cdot t \right) \frac{R_з\omega_з}{\rho} \cdot \cos\gamma + \frac{R_з^2\omega_з^2}{\rho^2} \cdot \left(1 - \sin^2\gamma \cdot \sin^2\varphi\right) \right]^{1/2} \tag{2.19}$$

Знаючи тепер величину проекції P пікселя на Землі із виразу (2.16) і величину швидкості переміщення V_Σ підстилаючої поверхні Землі із (2.19), визначимо час накопичення інформації на одному рядку CCD8091:

$$t_н = \frac{P}{V_\Sigma}. \tag{2.20}$$

Тоді частота зчитування рядків, виражена у герцах, буде дорівнювати

$$\mathrm{f} = \frac{1}{t_н}. \tag{2.21}$$

І, нарешті, знаючи тепер величину $t_н$ із залежності (2.13), а також P і V_Σ із (2.16) і (2.19), перепишемо вираз (2.15) у вигляді :

$$n \le \frac{a}{b} \cdot \frac{k \cdot \rho}{\psi_\Sigma + \frac{H}{V_\Sigma} \cdot \omega_{x0}}. \qquad (2.22)$$

Нижче у табл. 2.1 наведені результати числових оцінок величин V_Σ, ψ_Σ, ρ, $t_н$, f та n із залежностей (2.19), (2.10), (2.16), (2.20), (2.21) і (2.22) відповідно, при розмірах пікселя CCD8091 a=b=8,75мкм, k=0,5, μ=3,98602·10^5 км^3/с^2, $R_з$=6371км, ψ_{z0}=5′, T_z=261,8с, $\omega_з$=15″/с, γ=98°, f_0'=2260мм, ψ_1=ψ_2=±15′, $\psi_з$=±12′, ψ_{x0}=ψ_{y0}=5′, φ=0° (та φ=90°) та висотах орбіти H_1=490 км та H_2=668 км.

Аналізуючи результати розрахунків, наведених у табл. 2.1, звернемо увагу на пункт 7, у якому наведені результати обчислення максимально-допустимої кількості рядків накопичення інформації при роботі CCD8091 в режимі ЧЗН, зокрема при дистанційному зондуванні ділянок Землі, розташованих поблизу екватору.

Для цих ділянок кількість рядків, що можуть бути використані для накопичення інформації, при вибраному нами значенні k=0,5 не може бути більше шести. Причиною такого обмеження є не перпендикулярність ψ_Σ напрямку переміщення зображення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктива СВРЗ відносно поздовжньої осі рядку ЧЗН-фотоприймача, у результаті чого зображення довільно вибраної нами точки місцевості, розташоване, наприклад, в початковий момент експозиції у центрі деякого і-того пікселя початкового рядка ЧЗН-фотоприймача, вже на сьомому рядку зміститься (у залежності від напрямку зміщення) на (і-1)-ий або на (і+1)-ий піксель цього (сьомого) рядка, що є недопустимим. А оскільки у нашому СВРЗ у якості фотоприймального пристрою пропонується застосування ФП ЧЗН CCD8091 (Fairchild Imaging), у якому для накопичення інформації в режимі ЧЗН можна використати тільки 4, 8, 16, 32 або 64 рядків, то звідси виходить, що

для забезпечення однакових умов накопичення на всіх широтах земної поверхні залишається єдиний варіант чотирьохрядкового накопичення.

Таблиця 2.1

Параметри оцінок величин руху КА

№ п/п	Найменування параметра		Числове значення параметра при висоті орбіти H	
			490 км	668 км
1	Швидкість переміщення КА по орбіті, (м/с)		7077,766	6811,0001
2	Швидкість переміщення під-стилаючої поверхні Землі (без врахування наявності динамічних кутових коливань КА) V_{Σ}, (м/с)	в районі екватору	7156,9675	6890,7715
		у приполярній зоні	7142,2465	6875,4806
3	Неперпендикулярність напрямку вектора швидкості переміщення підстелаючої поверхні Землі відносно поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача $\Delta\psi$, (кут. хвил.)	в районі екватору	±267	±275,5
		у приполярній зоні	±47	±47
4	Величина проекції пікселя на поверхню Землі P, (м)		1,8971239	2,586283
5	Тривалість накопичення інформації на одному рядку ЧЗН-фотоприймача $t_н$, (с)	в районі екватору	$2{,}6507\cdot10^{-4}$	$3{,}7533\cdot10^{-4}$
		у приполярній зоні	$2{,}6562\cdot10^{-4}$	$3{,}7616\cdot10^{-4}$
6	Частота зчитування рядків f, (Гц)	в районі екватору	3772,55	2664,36
		у приполярній зоні	3764,8	2658,44
7	Допустима кількість рядків накопичення інформації при роботі в режимі ЧЗН, (n)	в районі екватору	6,25	5,99
		у приполярній зоні	31,12	29,31

Тим не менше, при дистанційному зондуванні і зйомці окремих, обмежених по широті, ділянок земної поверхні кількість рядків CCD8091, що

використовуються для накопичення інформації, може бути збільшена до 8, а для деяких ділянок (ще більш вузьких за широтою) навіть до 16. Так, наприклад, восьмирядкове накопичення може бути застосовано при зондуванні з висоти 490 км на ділянках земної поверхні, обмежених широтами +43°45′...+82° у Північній півкулі і мінус 43°45′.мінус 82° у Південній півкулі, а також при зондуванні з висоти 668 км на ділянках, обмежених широтами +47, 5°.+82° у Північній півкулі і мінус 47, 5° мінус 82° у Південній півкулі.

16-рядкове накопичення може бути застосовано при нахиленні орбіти γ=98° відповідно на широтах:

– від 76,5° до 82° та від мінус 6,5° до мінус 82° для орбіт висотою 490 км;

– від 77°45′ до 82° та від мінус 77°45′ до мінус 82° для орбіт висотою 668 км.

Обчислення нижніх границь широт виконувалось з використанням залежності [41]:

$$\phi_ш = \arcsin\cdot\left[\sin\gamma\cdot\sqrt{1-\left(\frac{\frac{\sqrt{\mu}}{\left(R_з+H\right)^{3/2}}-\omega_з\cdot\cos\gamma}{\omega_з\cdot\sin\gamma}\right)^2}\times\right. \quad , \qquad (2.23)$$

$$\left.\times tg^2\left(\frac{a}{b}\cdot\frac{k}{n}\cdot\rho\ -\ \frac{H}{V_\Sigma}\cdot\dot{\psi}_{x0}-\psi_1-\psi_2-\psi_з-\psi_y\right)\right]$$

де $\phi_ш$ – нижня границя широти місцевості, що зондується.

І, нарешті, як видно із п.7 Табл.2.1, 32-рядкове, а тим більше, 64-рядкове накопичення при прийнятих нами вихідних даних неможливо навіть у приполярних зонах земної поверхні.

Щоб визначити, при яких же умовах можливе 32-рядкове або 64-рядкове накопичення інформації, звернемося до залежності (2.15), з якої знайдемо

величину ψ_Σ і її одержане значення прирівняємо правій частині виразу (2.2). У результаті будемо мати:

$$\Delta\psi + \psi_1 + \psi_2 + \psi_з + \psi_y \le \frac{a}{b}\cdot\frac{k}{n}\cdot\rho - \frac{H}{V_\Sigma}\cdot\dot{\psi}_{x0}, \text{ звідки}$$

$$\frac{a}{b}\cdot\frac{k}{n}\cdot\rho \ge \Delta\psi + \psi_1 + \psi_2 + \psi_з + \psi_y + \frac{H}{V_\Sigma}\cdot\dot{\psi}_{x0}. \qquad (2.24)$$

Із нерівності (2.34) випливає, що для забезпечення 32-рядкового накопичення інформації сума кутів $\Delta\psi+\psi_з$ при $a=b$=8,75мкм, H=490 км, V_Σ=7156,9675 м/с (або при H=668 км і V_Σ=6890,7715 м/с), $\psi_1=\psi_2=\pm15'$, $\psi_y=5'$, k=0,5, ρ=3438′, n=32 повинна бути не більше:

- при зондуванні земної поверхні з висоти H=490 км:

$$|\Delta\psi+\psi_з| \le 10{,}5', \qquad (2.25)$$

- при зондуванні з висоти H=668 км:

$$|\Delta\psi+\psi_з| \le 7'. \qquad (2.26)$$

Ці вимоги можуть бути забезпечені тільки при умові розвороту КА навколо осі, паралельної радіусу-вектору, що проходить через центр Землі і центр мас КА, таким чином, щоби вісь Ох КА була орієнтована паралельно вектору напрямку результуючої швидкості переміщення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ. При цьому величини, що знаходяться в правих частинах нерівностей (2.25) і (2.26), будуть по суті допусками на утримання КА у цьому "узгодженому" положенні.

У якості кутоміра, який забезпечував би вимірювання кута розходження та видавав би команди на розворот і утримання КА у потрібному положенні, можуть бути використані або вимірювач координат Сонця, якщо вимірювання проводяться по Сонцю, або зірковий давач, якщо орієнтиром при вимірюваннях є якась зірка, яку видно з будь-якої точки орбіти.

Для вирішення питання про можливість використання 64-рядкового накопичення обчислимо у нерівності (2.24) її ліву частину, яка при $a=b$=8,75 мкм, k=0,5, ρ=3438′ та n=64 буде дорівнювати 26,86′ (кут. хвил.), і порівняємо її,

наприклад, з сумою трьох складових правої частини нерівності, тобто з $\psi_1+\psi_2+\psi_y$, рівній 35′ (кут. хвил.), дві з яких ($\psi_1=\psi_2=\pm15'$) – інструментальні похибки, а третя ($\psi_y=\pm5'$) – експлуатаційна. Із цього порівняння і приходимо до однозначного висновку про те, що при прийнятих нами у якості вихідних даних значеннях вказаних похибок застосування 64-рядкового накопичення інформації стає неможливим. Щоби воно стало реальним, необхідно ввести значно більш жорсткі допуски на величини ψ_1 и ψ_2, прийнявши їх рівними, наприклад, не більше ±3′ (кут. хвил.).

Таким чином, зондування Землі сканером високої роздільної здатності при роботі фотоприймача CCD8091 у режимі часової затримки з 4-рядковим накопиченням можливо на всіх широтах земної поверхні, з 8-и і 16-и рядковим накопиченням – тільки на середніх та високих широтах відповідно, а з 32-рядковим накопиченням інформації – тільки при умові довороту космічного апарату з встановленим на ньому сканером в положення, паралельне вектору результуючої швидкості переміщення зображення підстилаючої поверхні Землі у полі зору об'єктиву СВРЗ. При цьому для ділянок земної поверхні, розташованих на широтах від -17°48′ до +17°48′ при зондуванні їх з висоти 490 км, а також для ділянок, розташованих на широтах від -14°17′ до +14°17′ при зондуванні їх з висоти 668 км, можливе одне включення установки корекції положення КА з метою встановлення КА у потрібне "узгоджене" положення. Для ділянок, розташованих у середніх широтах, потрібно два, а для ділянок, розташованих у приполярних районах, необхідно навіть до п'яти включень установки КА. Однак, більш надійним і таким, що забезпечує необхідну точність, є метод безперервного розвороту КА за заданою програмою на протязі всього часу зйомки.

Режим ЧЗН з 64-рядковим накопиченням інформації у CCD8091 у теперішній час не може бути рекомендованим.

2.2.2. Вплив зміни висоти орбіти космічного апарата (КА) на вибір оптимальних значень часу експозиції і частоти сканування рядків фотоприймача CCD8091

У попередньому параграфі в пункті 5 табл. 2.1 наведені результати обчислення оптимальних значень тривалості накопичення інформації на одному рядку ЧЗН-фотоприймача CCD8091 при зондуванні ділянок земної поверхні з різних висот. З таблиці видно, що при проведенні зйомок земної поверхні, наприклад з висоти 490 км, оптимальні значення тривалості накопичення інформації у районі екватору і в приполярній зоні трохи відрізняються одне від одного і дорівнюють відповідно $2{,}6507\cdot10^{-4}$с та $2{,}6562\cdot10^{-4}$с. При однорядковому накопиченні інформації (тобто при використанні у сканері звичайних ПЗЗ-лінійок) ця різниця практично не буде впливати на якість знімків ділянок земної поверхні, що зондуються. Однак, якщо зйомка буде проводитися з використанням ЧЗН ФП типу CCD8091 у режимі 32-рядкового накопичення, то навіть ця незначна різниця в тривалостях накопичення інформації приведе до помітного погіршення якості та контрастності одержаних знімків. З цієї причини необхідно коректувати тривалість накопичення в залежності від широти Землі, де проводиться зйомка.

Але особливо значний вплив на величину тривалості накопичення чинить відхилення реальної висоти орбіти КА від номінальної (запланованої), викликане як нестабільністю гравітаційного потенціалу Землі, так і еліптичністю орбіти КА. Так, наприклад, для КА "EgyptSat-1" перигей його орбіти при номінальній висоті 668 км дорівнював 666 км, а апогей - відповідно 683,6 км. Тому орієнтовно для оцінки впливу зміни висоти орбіти на тривалість експозиції приймемо, що висота орбіти H може у процесі експлуатації КА змінюватись на величину $\Delta H=\pm20$ км. Із-за зміни висоти орбіти автоматично буде змінюватися швидкість $V_{\sum}$ переміщення підсупутникової точки і розмір проекції пікселя P на земній поверхні, тому у відповідності з цими змінами

необхідно у СВРЗ обов'язково змінювати тривалість експозиції $t_н$ на одному рядку ЧЗН-фотоприймача CCD8091, і, відповідно, частоту f зчитування рядків.

Нижче в перших чотирьох рядках табл. 2.2 наведені результати числових оцінок величин V_Σ, P, $t_н$ та f. При цьому обчислення виконувались з використанням залежностей (2.19), (2.16), (2.20) та (2.21) попереднього параграфу. У п'ятому рядку таблиці наведені різниці частот зчитування рядків фотоприймача, які показують, на які величини необхідно їх змінити, щоби забезпечити надійну високоякісну роботу СВРЗ. Усі обчислення проводились для двох груп висот: у першій групі – номінальна висота 668 км і відхилення від неї в один і другий боки на ±20 км (648 км і 688 км), у другій групі – номінальна висота 490 км і відповідне відхилення від неї (470 км і 510 км).

У шостому рядку таблиці наведені результати обчислення максимально-допустимої кількості рядків ЧЗН-фотоприймача CCD8091, які можуть бути використані при накопиченні інформації сканером високої роздільної здатності у випадку, коли після зміни висоти орбіти на ±20 км у СВРЗ зберігаються значення $t_н$ та f , що відповідають номінальній висоті.

Таблиця 2.2

Результати розрахунків параметрів КА

№	Найменування параметра	Висота орбіти, (км)					
		648	668	688	470	490	510
1	Швидкість переміщення підсупутникової точки V_Σ, (м/с)	6944,476	6875,481	6821,97	7205,789	7142,247	7093,187
2	Розмір проекції пікселя на поверхні Землі, P (м)	2,50885	2,58628	2,66372	1,81969	1,897124	1,97456

Продовження таблиці 2.2

3	Тривалість експозиції на одному рядку $t_н$, (с)		3,61273 $\cdot 10^{-4}$	3,7616 $\cdot 10^{-4}$	3,904615 $\cdot 10^{-4}$	2,52532 $\cdot 10^{-4}$	2,6562 $\cdot 10^{-4}$	2,78374 $\cdot 10^{-4}$
4	Частота зчитування рядків f, (Гц)		2767,99	2658,44	2561,07	3959,9	3764,78	3592,29
5	Різниця частот, (Гц)		+109,55		- 97,37	+195,12		- 172,49
6	Допустима кількість рядків накопичення інформації при зміні висоти , (n_1)	при k_1=0,5	14,18		15,06	10,61		11,52
		при k_1=1	28,35		30,13	21,22		23,04

Обчислення величини n_1 проводилось з використанням нерівності:

$$n_1 \le \frac{k_1}{\left| 1 - \frac{H}{H + \Delta H} \cdot \left(\frac{R_з + H}{R_з + H + \Delta H} \right)^{3/2} \right|}, \qquad (2.27)$$

де k_1 – допустима величина розмиття зображення ділянки підстилаючої поверхні Землі у напрямку польоту КА, виражена у долях проекції пікселя. Обчислення проводились для двох значень k_1, рівних k_1=0,5 і k_1=1. Розрахунки проведені для приполярних широт поверхні Землі.

Із результатів обчислень, показаних у шостому рядку таблиці, випливає, що якщо висота орбіти неочікувано змінилася, а основні параметри настройки СВРЗ, тобто тривалість накопичення інформації та частота зчитування рядків

залишились попередніми, розрахованими на номінальну висоту, то у процесі роботи СВРЗ виникнуть збої, пов'язані, по перше, з неузгодженістю швидкості переміщення зображення ділянок підстилаючої поверхні Землі, а по друге - з неузгодженістю часу накопичення і частоти зчитування інформації. У результаті цього на зображення ділянки поверхні, що зондується, буде накладатися зображення сусідньої (наступної або попередньої) ділянки і тим самим суттєво погіршиться якість та контрастність результуючого знімка. Так, наприклад, якщо налаштування СВРЗ проводилась із розрахунку роботи з висоти 490 км, а остання змінилась і стала рівною 470 км, то при 32- рядковому накопиченні, як видно з таблиці , вже після 21-го рядка накопичення сигналу, що надходить від певної ділянки земної поверхні, в той же вертикальний регістр CCD8091 із-за наявності недопустимо великого розмиття зображення на протязі наступних 11-и рядків накопичення почнуть надходити сигнали від ділянки, що суміжна з попередньою. Таким чином сигнали від різних ділянок будуть накладатися один на другий, що є абсолютно недопустимим.

Це є ще однією обставиною, що обмежує можливість роботи СВРЗ у режимі ЧЗН з багаторядковим накопиченням.

З метою виключення в подальшому подібних ситуацій, необхідно кожен раз перед початком зондування передбачати можливість визначення і уточнення координат і місця знаходження КА на орбіті, встановивши для цього на борту КА супутникову навігаційну апаратуру, що забезпечує високоточне визначення координат КА з використанням інформації від усіх видимих супутників як GPS, так і ГЛОНАСС.

Після визначення висоти орбіти необхідно також уточнити величину нахилення орбіти і визначити поточне значення аргумента широти КА. За цими даними треба вирахувати лінійну швидкість переміщення підсупутникової точки, і, знаючи розміри пікселя ЧЗН-фотоприймача та фокусну відстань об'єктива СВРЗ, з врахуванням нового значення висоти орбіти визначити розміри проекції пікселя на поверхні Землі і за новими даними уточнити та

провести корекцію тривалості накопичення інформації на одному рядку і, відповідно, частоти зчитування рядків.

Тільки після завершення вказаних операцій можна проводити зондування земної поверхні.

2.3. Вплив параметрів об’єктива пристрою формування зображення на якість формування зображення

Об'єктив – оптична система, що є частиною оптичного приладу, яка направлена до об'єкта спостереження або зйомки, що формує його зображення. Зазвичай об'єктив складається з набору лінз (в деяких об'єктивах – з дзеркал, розрахованих для взаємної компенсації аберацій) зібраних в єдину систему всередині оправи [30].

Основні характеристики об’єктивів:

- фокусна відстань (і можливість її зміни) f_0' – відстань від оптичного центру об’єктива до площини сенсора за умови, що об'єктив наведений на нескінченність;
- кратність зуму, об'єктива зі змінною фокусною відстанню – відношення більшої фокусної відстані до меншої для конкретного об’єктива;
- кут поля зору об'єктива – кут між двома променями, що проходять через центр вхідної зіниці об'єктива до найбільш віддалених від оптичної осі відображуваних точок об'єкта в площині об’єкта;
- світлосила – величина, що характеризує ступінь світлопропускання об'єктива. Розрізняють геометричну і ефективну світлосилу. Геометрична світлосила обчислюється, як відношення максимального діаметра вихідної зіниці об'єктива до його задньої фокусної відстані. Ефективна світлосила крім цього співвідношення враховує світлорозсіювання, що знижує кількість прохідного світла;

- максимальний відносний отвір – відношення діаметра вхідної зіниці об'єктива D до його фокусної відстані f_0'. Його величину виражають у вигляді дробу: D/f_0';
- рівень і характер оптичних спотворень (аберацій);
- роздільна здатність – характеристика фотографічного об'єктива, яка відображає його властивість передачі чіткого зображення (див. 1.2);

Для кожного об’єктива існує відносний отвір діафрагми, при якому його роздільна сила максимальна. Це обумовлено тим, що спочатку при діафрагмуванні відбувається поліпшення зображення за рахунок зменшення аберацій, а потім погіршення за рахунок дифракції.

Для визначення оптимального за роздільною здатністю розміру отвору діафрагми для конкретного об'єктива слід звернутися до результатів тестів. В цілому, з ростом максимальної роздільної здатності її максимум зміщується в бік більш відкритої діафрагми.

Фотографічні об’єктиви служать для отримання зображення на цифровій матриці, які також володіють певною роздільною здатністю. Тому для повного використання роздільної здатності об’єктива слід використовувати його з відповідними матрицями, роздільна здатність яких дорівнює або вище роздільної здатності об'єктива, оскільки роздільна здатність системи об'єктив + світлочутливий елемент завідомо не вище роздільної здатності кожного компонента.

2.4. Вплив апертури пікселя ПЗЗ-давача на якість сформованого зображення систем ДЗЗ

Якщо розглянути типовий давач зображення, то він містить пікселі деякої форми, як правило, квадратної. Форма пікселя давача впливає на імпульсний відгук системи формування зображення, який називається функцією розсіювання точки $h(\xi,\eta)$ [12, 61, 87, 91], яка описує залежність розподілу

освітленості об’єкта від координат (ξ,η) в площині сформованого зображення від точкового об’єкту з координатами (x,y). В ідеальній оптичній системі, вільній від дифракції, точка відображається у вигляді точки, а в реальній оптичній системі відображається у вигляді плями розсіювання (для систем з круглою апертурою у вигляді диска Ейрі) [23, 34, 88].

Лінійно-фільтрова модель процесу формування зображення, яка основана на розгляді рівняння Фредгольма 1-го роду з ядром типу згортки в спектральній області виглядає як попереднє застосування низькочастотного просторового фільтра з подальшою просторовою дискретизацією вхідного зображення [50, 88].

$$I(i,j) = S \cdot D\left\{ I(x,y) \oplus h(\xi,\eta,x,y) + N(x,y) \right\}, \qquad (2.28)$$

де S – коефіцієнт чутливості ПЗЗ-давача;

$D\{-\}$ – оператор дискретизації;

$I(x,y)$ – вхідне зображення;

$h(\xi,\eta,x,y)$ – функція апертури пікселя;

$N(x,y)$ – шум давача;

x,y,ξ,η – лінійні координати;

i,j – дискретні координати;

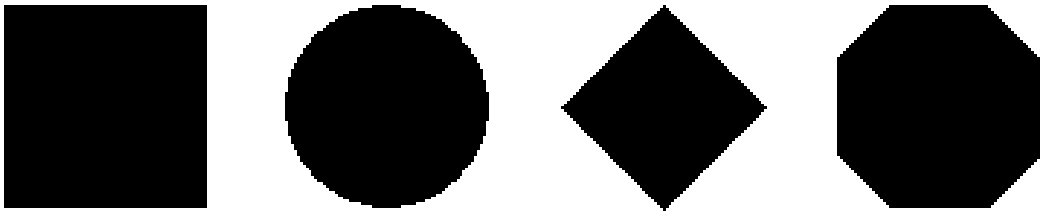
$\oplus$ – оператор згортки.

Дана модель враховує послаблення високих просторових частот вхідного зображення досліджуваного об’єкта, що приводить до зменшення чіткості відтворення його дрібних деталей і погіршення роздільної здатності.

На основі описаної моделі формування зображення стає очевидним зв'язок між потенційною роздільною здатністю і властивістю низькочастотного фільтра викликаною формою апертури пікселя.

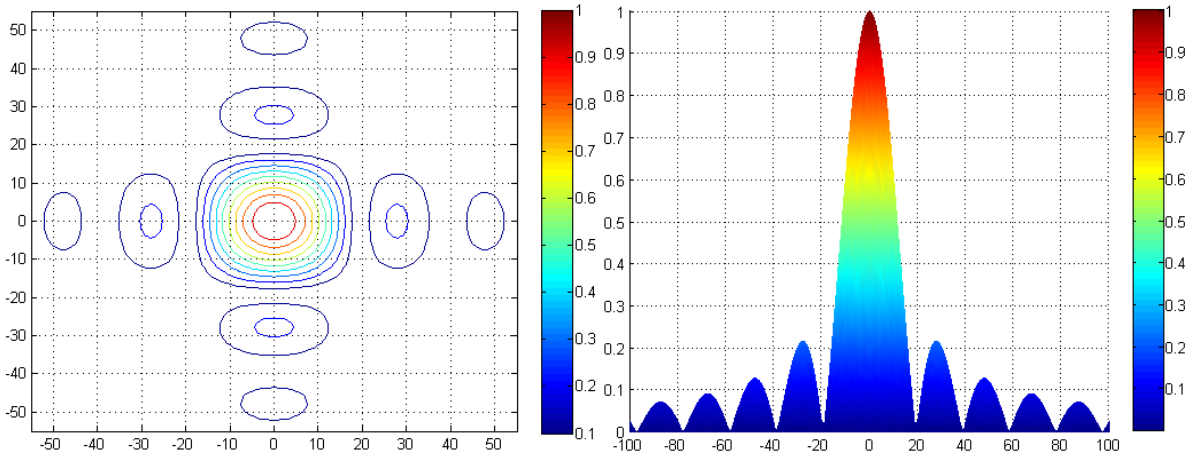
Для оцінки впливу апертурної функції $h(\xi,\eta)$ на контрастно-частотну характеристику і, відповідно, якість сформованого зображення синтезовано чотири форм апертур пікселів (рис. 2.2). Для кожної із форм апертур проведено розрахунок контрастно-частотних характеристик, які приведені на рис. 2.3.

Найкращі результати отримані з круглою формою апертури пікселя. Але площа круглого пікселя є меншою від квадратної і відповідно меншою є чутливість.

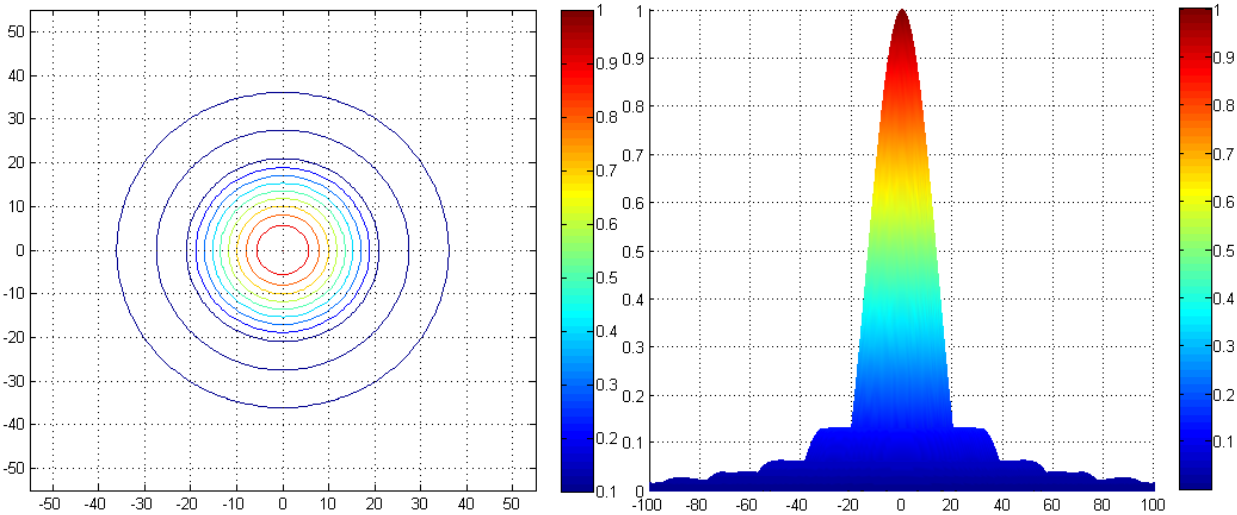


а) б) в) г)

Рисунок 2.2 – Форма апертури пікселя: а) – квадратна, б) – кругла, в) – ромбоподібна, г) – з усіченими кутами

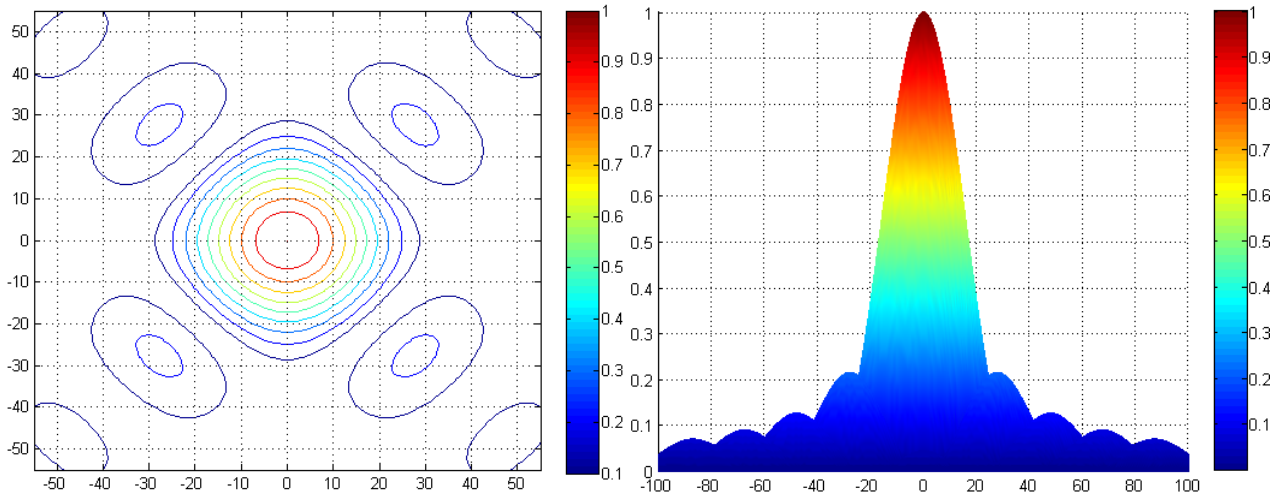


а)

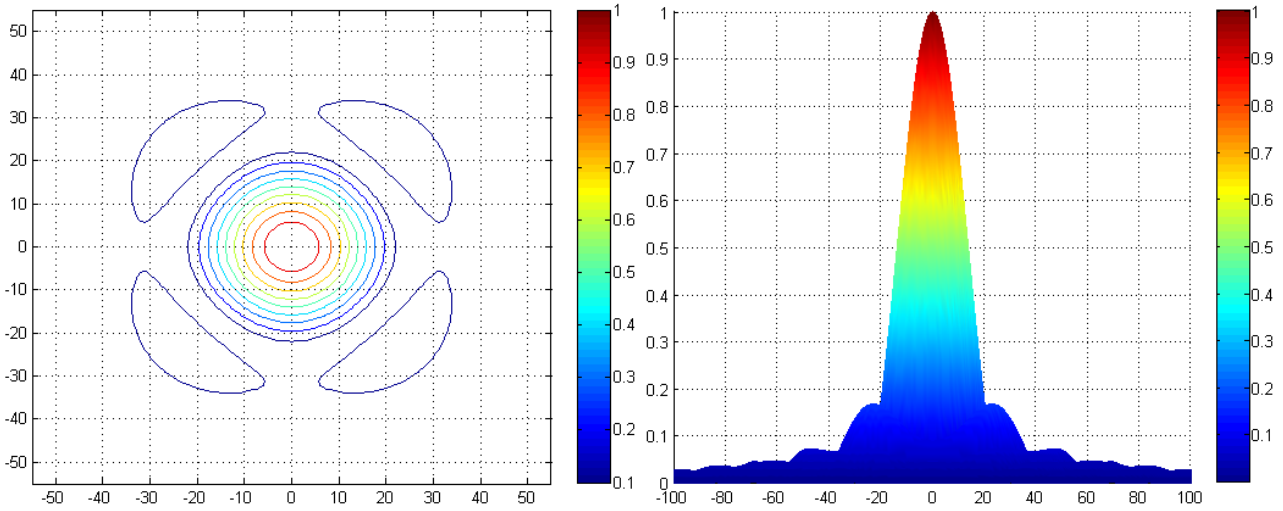


б)

Рисунок 2.3 – Контрастно-частотна характеристика: а) квадратна форма пікселя; б) кругла форма



а)



б)

Рисунок 2.4 – Контрастно-частотна характеристика: а) ромбоподібна форма; б) форма з усіченими кутами

Як видно, для вибраних апертур пікселів, окрім круглої форми, є наявними як центральні неперервні області просторових спектральних складових, так і додаткові окремо виділені області більш високочастотних спектральних складових. Так як роздільна здатність обмежується шириною спектру апертурної функції пікселя, то, очевидно, чим ширший просторовий спектр апертурної функції і менша його анізотропія, за напрямами, тим краща буде роздільна здатність. Ізотропія за напрямами характерна тільки для круглої форми апертури пікселя (рис. 2.3 б). Для інших форм апертур, особливо для квадратної (рис. 2.3 а) і ромбоподібної (рис. 2.4 а) є просторові кути, в яких

відсутні просторові спектральні складові, тобто в межах цих кутів не представленні просторові спектральні складові досліджуваних об’єктів.

Для оцінки впливу форми пікселя на якість відновлення використовується середньоквадратичне відхилення (2.29) [28].

$$NMSE = \left(\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(I(i,j) - \hat{I}(i,j) \right)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(I(i,j) \right)^2 \right) \cdot 100\%, \qquad (2.29)$$

де M, N – розміри зображення;

$I(i,j)$, $\hat{I}(i,j)$ - тестове та сформоване зображення.

На рис. 2.5 приведено залежності середньоквадратичного відхилення формування сигналів, що відповідають сформованим інтенсивностям освітлення для різних форм апертур пікселів давача від відношення сигнал/шум. Розрахунки проведено для напрямків сканування, які співпадають з напрямками головної осі контрастно-частотних характеристик апертур пікселів.

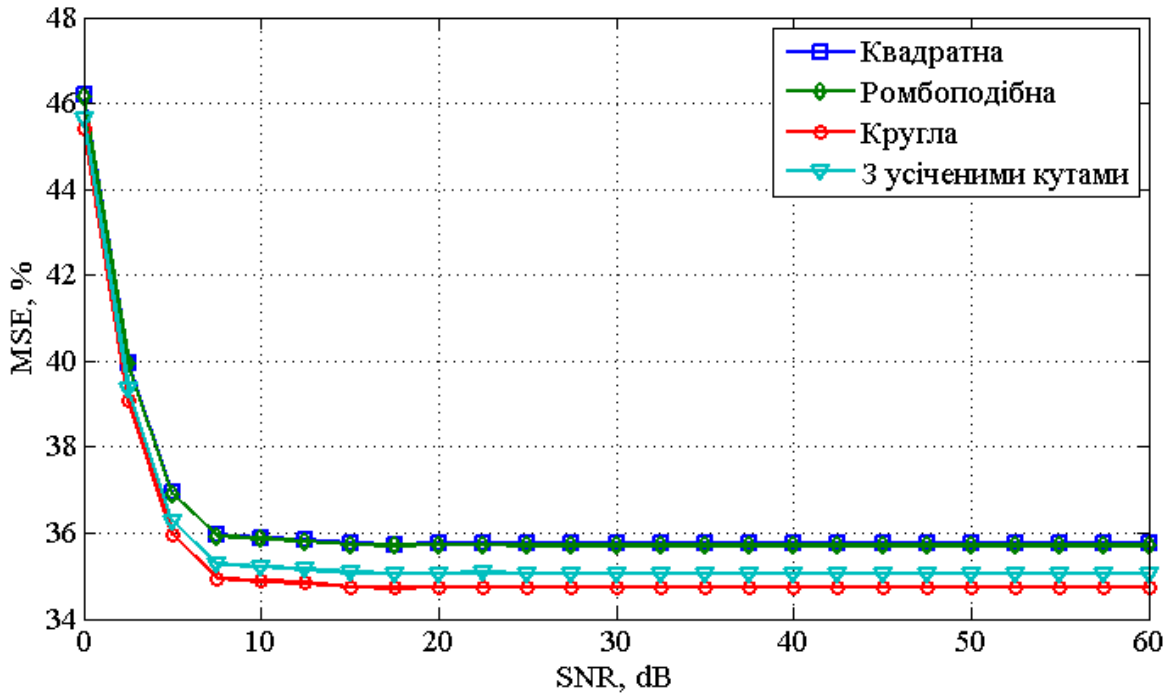


Рисунок 2.5 – Залежність середньоквадратичного відхилення значень інтенсивностей пікселів сформованого зображення від ідеального для різних значень відношення сигнал/шум для різних форм апертури пікселів

Як видно з рис. 2.5 найменшу похибку забезпечує апертура пікселя круглої форми і наближеною до неї є апертура з усіченими краями. Значення похибки в обох напрямках сканування є однаковими.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто фактори, що впливають на роздільну здатність СВРЗ, вплив параметрів стабілізації КА на допустиме число стадій накопичення CCD8091, вплив зміни висоти орбіти КА на вибір оптимальних значень часу експозиції і частоти сканування рядків CCD8091, вплив апертури пікселя.

2. Показано, що параметри стабілізації КА, на якому встановлено СВРЗ з ЧЗН-фотоприймачем, суттєво впливають на розмивання зображення, і це розмивання збільшується при зростанні кількості рядків накопичення у ЧЗН-фотоприймачі. Зроблено висновок, що при проектуванні СВРЗ необхідно шукати компроміс між максимально-допустимою кількістю задіяних рядків накопичення у застосованому нами ЧЗН-фотоприймачі CCD8091, від якої залежить забезпечення заданого для СВРЗ відношення сигнал-шум, та вимогами до стабілізації КА.

3. Проведено аналіз та розрахунок максимально-допустимого числа стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі типу CCD8091, застосованому у СВРЗ, при умові забезпечення ним проекції пікселя на Землі 1,9м з висоти орбіти КА 490км (або, відповідно, 2,6м з висоти 668км) і при значеннях параметрів стабілізації КА, досягнутих на сучасних вітчизняних супутниках.

4. Сформульовано вимоги до параметрів стабілізації КА зі сканером високої роздільної здатності при проведенні зйомки ділянок на різних широтах земної поверхні при умові застосування максимально можливого числа стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі CCD8091.

5. Проаналізовано вплив відхилення номінальної (запланованої) висоти польоту КА над земною поверхнею на обмеження максимально-можливого числа стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі CCD8091. З метою

недопущення розмиття зображення рекомендовано кожен раз перед початком зондування визначати точну висоту КА, уточнювати величину нахилення орбіти КА і визначати поточне значення аргумента широти, де проводиться зйомка. За цими даними необхідно вирахувати лінійну швидкість переміщення підсупутникової точки, визначити розміри проекції пікселя на поверхні Землі і за новими даними провести корекцію тривалості накопичення інформації на одному рядку фотоприймача CCD8091.

6. В результаті дослідження зроблено висновок: процес формування зображення за допомогою давача зображення показує, що апертура пікселя являє собою просторовий фільтр нижніх частот і погіршує просторову роздільну здатність навіть при використанні декількох давачів зображення зміщених на субпіксельну відстань.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУБПІКСЕЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ СКАНЕРОМ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ

3.1. Принципи організації субпіксельної обробки зображень

Простим прикладом організації субпіксельної обробки, є метод, в якому в якості вхідних даних використовуються два зображення, отриманих при скануванні із зсувом на половину пікселя тільки по одному напрямку. [3]

У процесі обробки піксель вихідного зображення розбивається на чотири пікселя результуючого. При цьому за рахунок використання другого зображення здійснюється уточнення значень пікселів по рядках матриці зображення. За стовпцями кожен піксель дублюється, це не підвищує якості, але зберігає пропорції вихідного зображення. Представлений алгоритм збільшує кількість рядків зображення до $2n_{ряд}+1$, де $n_{ряд}$ – число рядків вихідного зображення [3].

Розглянутий алгоритм дає незначне поліпшення зображення тільки в горизонтальному напрямку. У його основі лежить принцип усереднення.

Результуюче зображення значно поступається в якості зображенню, отриманому фотоприймачем з такою ж кількістю пікселів, як і вихідного зображення. Однак метод має ряд переваг. В якості вихідних даних використовується всього два зображення. Досить просто організувати зміщення об'єктива фотосистеми тільки в одному напрямку [3].

Більш кращих результатів можна досягнути при формуванні зображення, якщо в якості вхідних даних використовуються два зображення, отриманих при скануванні із зсувом на половину пікселя в обох напрямках. Для цього методу використовують дві ПЗЗ-лінійки, взаємне просторове розташування яких зображено на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 – Просторове розташування двох ПЗЗ-лінійок

На рис. 3.2 зображено просторовий розподіл пікселів двох зображень.

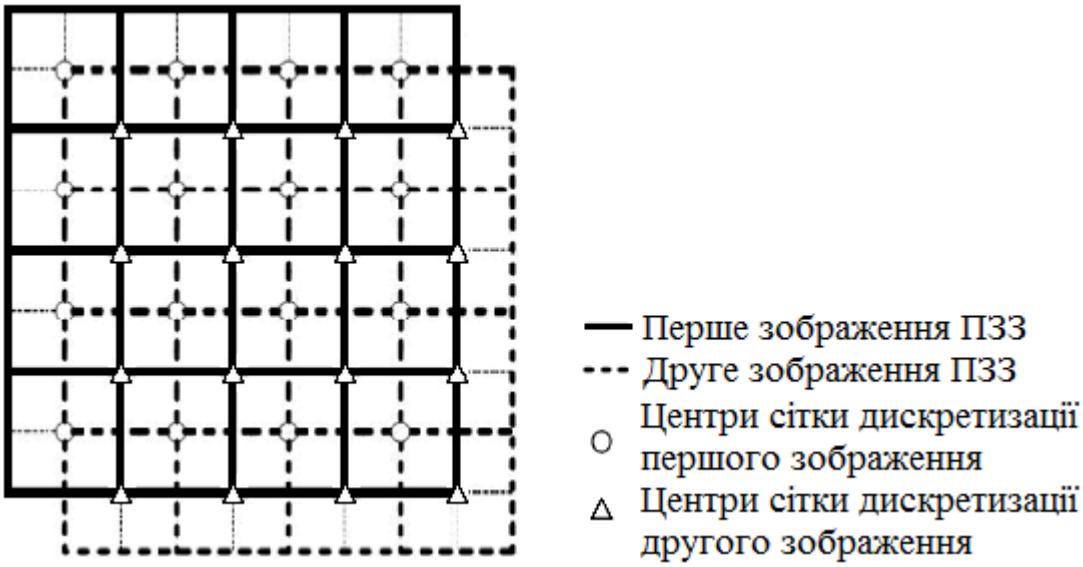


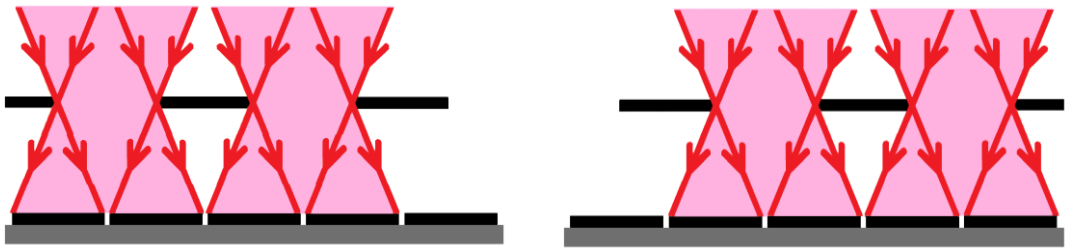
Рисунок 3.2 – Просторовий розподіл пікселів двох зображень

Таке формування (рис. 3.2) дає уточнення значень пік селів по рядках і по стовпцях матриці зображення. Але сформоване зображення виходить дещо розмитим, нечітким. [3]

Описаний в [3, 4] метод субпіксельної обробки полягає у формуванні зображення високої роздільної здатності з серії зображень низької роздільної здатності, який дещо підвищує роздільну здатність, але не враховує впливу цілого ряду факторів, таких як апертура пікселя, наявність шумів і інших.

Описаний в [2] принцип підвищення роздільної здатності цифрового зображення з використанням розфокусування. Полягає в наступному: у площині, близькій до фокальної, оптичною системою формується різке оптичне

зображення віддаленого об'єкта. В площині максимального фокусування розміщується непрозорий для оптичних променів екран. Екран складається з системи періодично розташованих діафрагм, що пропускають світло і формують розфокусоване зображення на ПЗЗ-лінійці того ж розміру. Екран з діафрагмами називається маскою. Маска може зміщуватися вздовж напрямку, що визначається перетином фокальної площини і площини зображення, на відстань рівну ширині діафрагми. На рис. 3.3 показані відповідні положення лінійки детекторів щодо маски. Сигнали детекторів в кожному з двох положень маски представляють розфокусоване зображення фрагментів, вирізаних діафрагмами з зображення у фокальній площині. Відстань між фокальною площиною і площиною лінійки детекторів вибирається такою, щоби розфокусовані зображення сусідніх фрагментів не перетиналися. У такому випадку сигнали двох детекторів можуть бути однозначно пов'язані з сигналами віртуальних детекторів, поперечні розміри яких в два рази менші ніж у реальних детекторів, розташованих на місці відповідної діафрагми. На основі цього можна отримати зображення яке має роздільну здатність в два рази більшу в ідеальних умовах. [2]



а) б)

Рисунок 3.3 – Одновимірна модель системи формування двох зображень за допомогою лінійки детекторів: а) початкове положення маски; б) зсунуте положення маски

Недоліком цього методу є потреба виготовлення прецизійної маски, а також виготовлення прецизійного механізму для руху цієї маски в процесі зйомки.

Система субпіксельної обробки зображень також встановлена у французькому супутнику SPOT5 [95]. Вона дозволяє отримати від двох панхроматичних зображень з роздільною здатністю 5 м, зображення з роздільною здатністю 2,5 – 3 м. Спеціальне програмне забезпечення для обробки зображень, розроблена французьким космічним агентством CNES використовується для остаточного відновлення зображення після трьох етапів обробки: інтерполяції, деконволюції та видалення шуму.[94]

У обробці зображень існує клас методів надвисокої роздільної здатності (НРЗ), які дозволяють якісно збільшити роздільну здатність вихідного зображення. Алгоритми НРЗ використовують два підходи для обчислення результуючого зображення: 1) на базі великої кількості кадрів одного об'єкта [66, 71, 75]; 2) система яка самонавчається з базою зразків. У першому підході при великій кількості кадрів (10-20) одного об’єкта роздільна здатність підвищується за рахунок збільшення інформативності. Недоліком цього методу є те, що для його роботи потрібна значна кількість кадрів, тому використовувати цю систему можна тільки для зйомки статичних об’єктів. На практиці цей підхід може використовуватися тільки для невеликого збільшення роздільної здатності [102].

В [68] запропоновано другий підхід в якому застосовуються статистичні алгоритми, а зразки беруться з єдиного зображення. Отже на відміну від попереднього методу його можна використовувати для зйомки динамічних об’єктів та сцен. Автори роботи [68] порівняли свій метод з двома стандартними способами інтерполяції – метод найближчого сусіда і бікубічна інтерполяція та методами які базуються на техніці з базою зразків, описаними в [75]. Метод запропонований в [68] дав найкращі результати, а саме краще підвищення роздільної здатності зображення. Але даний метод потребує значних обчислювальних ресурсів.

Таким чином на основі аналізу можна зробити висновок, що підвищення роздільної здатності системи доцільно проводити методами субпіксельної

обробки, які вимагають врахування факторів впливу на формування зображень, уточнення моделі формування, забезпечення завадозахищеності системи.

3.1.1. Принципи побудови оптичної системи для субпіксельної обробки

На рис. 3.4 показана система субпіксельної обробки з використанням двох ПЗЗ-лінійок в якості детекторів [100]. Вона складається з оптичної лінзи *1*, дільника оптичного променя *2*, та двох однакових ПЗЗ-лінійок *3* та *3'* з однаковими розмірами пікселів. Дільник оптичного променя розділяє падаюче світло на два променя, кожен з розділених променів потім проектується на своїй лінійці. Дві ПЗЗ-лінійки настроюються таким чином, щоби вони були зсунуті одна відносно іншої на половину розміру пікселя [100]. Процес синтезу зображення показано на рисунку 3.4. Сигнали з виходів ПЗЗ-лінійок поступають на аналого-цифрові перетворювачі *4* та *4'*, з яких оцифровані сигнали поступають на обчислювальний пристрій *5*. В ньому проводяться операції синтезу, деконволюції, фільтрації шумів.

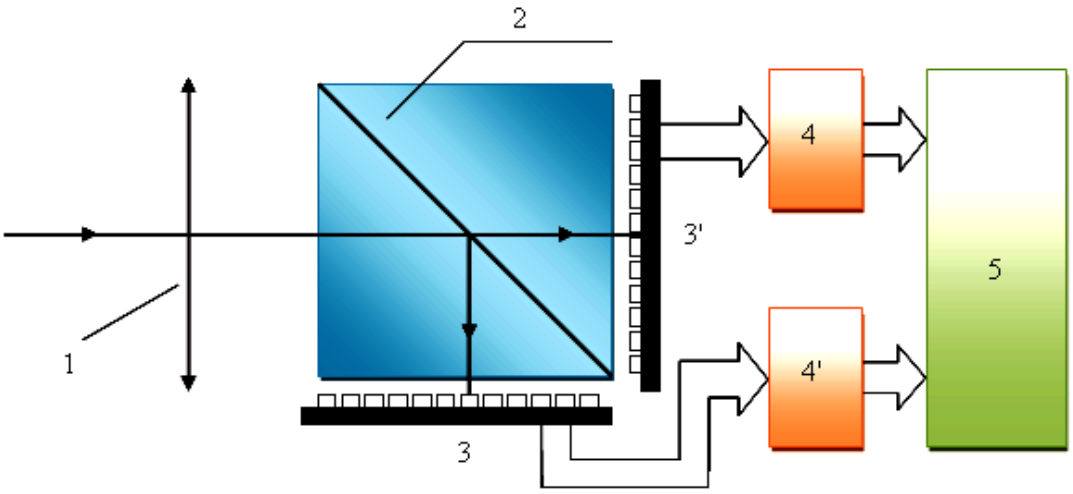


Рисунок 3.4 – Структурна схема оптичного давача субпіксельної технології зйомки: 1 – об’єктив; 2 – дільник оптичного променя; 3 і 3' – дві ПЗЗ-лінійки зміщених на половину пікселя; 4 і 4' – аналого-цифрові перетворювачі; 5 – обчислювальний пристрій

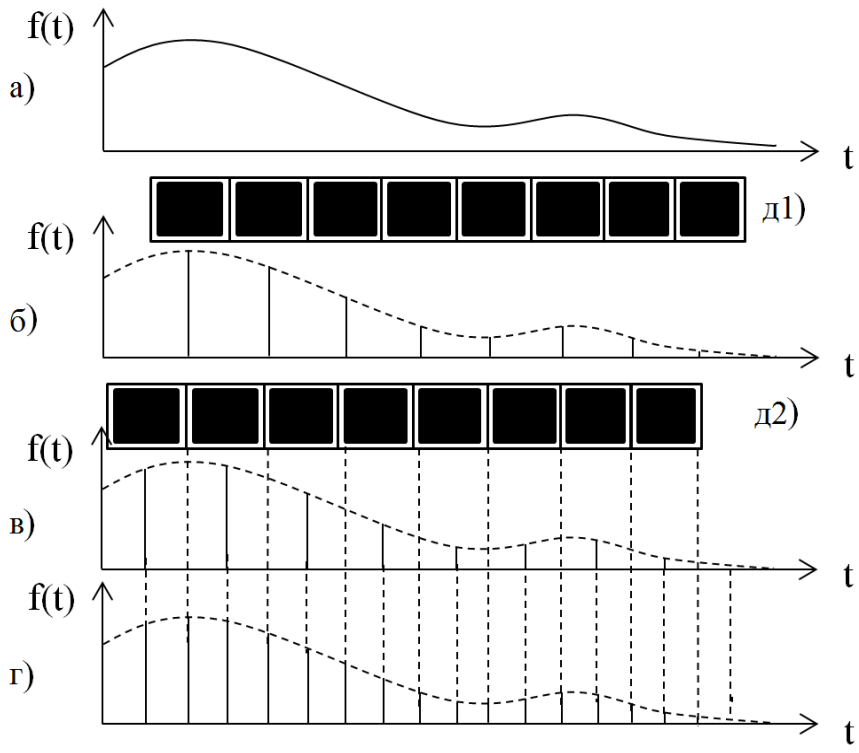


Рисунок 3.5 – Принцип субпіксельної обробки з двома ПЗЗ-лінійками: а) сигнал зображення оригіналу; б) дискретизований сигнал з першої ПЗЗ-лінійки; в) дискретизований сигнал з другої ПЗЗ-лінійки; г) синтезований сигнал; д1) перша ПЗЗ-лінійка; д2) друга ПЗЗ-лінійка

Як видно з рис. 3.5, що після синтезу двох зображень низької роздільної здатності, б і в, можна отримати новий зразок г з вибіркою, еквівалентною половині вибірки попереднього зображення, тобто вихідний сигнал оцифровується з більш високою частотою вибірки [48, 100].

Такий оптичний давач було розроблено в Сіанському інституті оптики і точних механізмів, в Китаї [100]. Цей метод при зменшенні розмірів і ваги давача, підвищує роздільну здатність камери в 1,6 рази.

Недоліком цього методу є те, що при проходженні світла через дільник оптичного променя, промінь розділяється на дві частини, тобто до кожної ПЗЗ-лінійки дійде, в ідеальному випадку, тільки половина світлового потоку, а в реальності потрібно враховувати ще незначне поглинання потоку дільником.

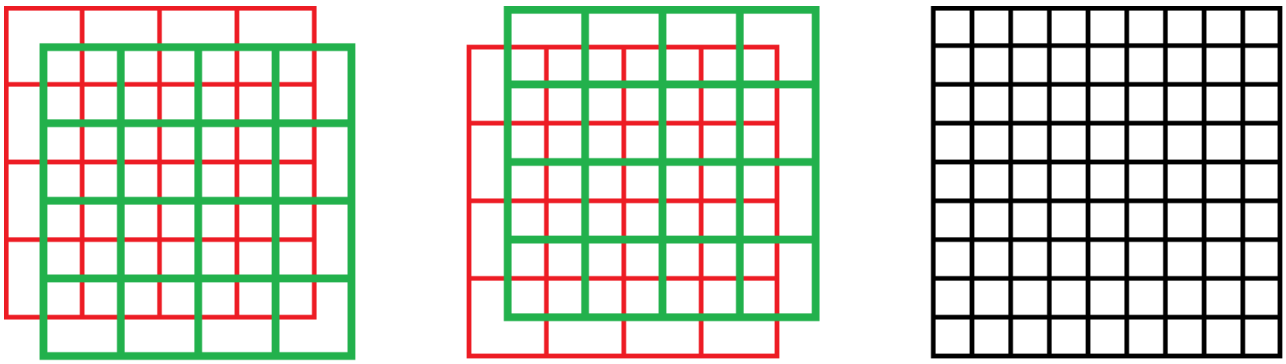
В [84] описана система для аерофотозйомки ADS 40, камера якої складається з трьох панхроматичних лінійок. Кожен панхроматичний канал

складається з двох ПЗЗ-лінійок, кожна з яких має 12000 пікселів, зміщених одна відносно іншої на 0,5 пікселя. В даній системі дві ПЗЗ-лінійки знаходяться в одному ПЗЗ-пристрої, тобто в одній площині. Перевагою є спрощення прецизійної настройки двох лінійок, як в попередньому методі. Але водночас недоліком є можливе розмиття зображення, якщо на поверхні Землі буде рухатися об’єкт на високій швидкості.

3.2. Матрична модель процесу субпіксельного формування зображень сканером

Для аналізу процесу субпіксельного формування зображень сенсором доцільно розглянути його модель.

Розглянемо застосування двох ПЗЗ-лінійок для формування чотирьох зображень розміром n x m, де n і m – кількість рядків та стовбців зображення яке формується однією лінійкою, для формування результуючого зображення розміром 2n x 2m. На рис. 3.6 зображено принцип формування чотирьох низькороздільних зображень двома лінійками розташованих так, як показано на рис. 3.1. Кожна лінійка формує два зображення з кроком b/2, де b – розмір пікселя в напрямку сканування.



а) б) в)

Рисунок 3.6 – Схеми отримання чотирьох низькороздільних зображень: а) перша пара зображень; б) друга пара зображень; в) зображення сформоване на основі а) і б)

Запишемо високороздільне зображення в матричній формі:

$$x_{i,j} = \begin{Bmatrix} x_{0,0} & x_{0,1} & x_{0,2} & \cdots & x_{0,2n-1} \\ x_{1,0} & x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,2n-1} \\ x_{2,0} & x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,2n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{2m-1,0} & x_{2m-1,1} & x_{2m-1,2} & \cdots & x_{2m-1,2n-1} \end{Bmatrix}. \quad (3.1)$$

Матриці зображення, сформовані двома ПЗЗ-лінійками, приймуть вигляд:

$$Y1_{i,j} = \begin{Bmatrix} x_{0,0}+x_{0,1}+x_{1,0}+x_{1,1} & x_{0,2}+x_{0,3}+x_{1,2}+x_{1,3} & \cdots & x_{0,n-2}+x_{0,n-1}+x_{1,n-2}+x_{1,n-1} \\ x_{2,0}+x_{2,1}+x_{3,0}+x_{3,1} & x_{2,2}+x_{2,3}+x_{3,2}+x_{3,3} & \cdots & x_{2,n-2}+x_{2,n-1}+x_{3,n-2}+x_{3,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m-2,0}+x_{m-2,1}+x_{m-1,0}+x_{m-1,1} & x_{m-2,2}+x_{m-2,3}+x_{m-1,2}+x_{m-1,3} & \cdots & x_{m-2,n-2}+x_{m-2,n-1}+x_{m-1,n-2}+x_{m-1,n-1} \end{Bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$Y2_{i,j} = \begin{Bmatrix} x_{1,0}+x_{1,1}+x_{2,0}+x_{2,1} & x_{1,2}+x_{1,3}+x_{2,2}+x_{2,3} & \cdots & x_{0,n-2}+x_{0,n-1}+x_{1,n-2}+x_{1,n-1} \\ x_{3,0}+x_{3,1}+x_{4,0}+x_{4,1} & x_{3,2}+x_{3,3}+x_{4,2}+x_{4,3} & \cdots & x_{3,n-2}+x_{3,n-1}+x_{4,n-2}+x_{4,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m-1,0}+x_{m-1,1}+x_{m,0}+x_{m,1} & x_{m-1,2}+x_{m-1,3}+x_{m,2}+x_{m,3} & \cdots & x_{m-2,n-2}+x_{m-2,n-1}+x_{m-1,n-2}+x_{m-1,n-1} \end{Bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$Y3_{i,j} = \begin{Bmatrix} x_{1,1}+x_{1,2}+x_{2,1}+x_{2,2} & x_{1,3}+x_{1,4}+x_{2,3}+x_{2,4} & \cdots & x_{1,n-1}+x_{1,n}+x_{2,n-1}+x_{2,n} \\ x_{3,1}+x_{3,2}+x_{4,1}+x_{4,2} & x_{3,3}+x_{3,4}+x_{4,3}+x_{4,4} & \cdots & x_{3,n-1}+x_{3,n}+x_{4,n-1}+x_{4,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m-1,1}+x_{m-1,2}+x_{m,1}+x_{m,2} & x_{m-1,3}+x_{m-1,4}+x_{m,3}+x_{m,4} & \cdots & x_{m-1,n-1}+x_{m-1,n}+x_{m,n-1}+x_{m,n} \end{Bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$Y4_{i,j} = \begin{Bmatrix} x_{0,1}+x_{0,2}+x_{1,1}+x_{1,2} & x_{0,3}+x_{0,4}+x_{1,3}+x_{1,4} & \cdots & x_{0,n-1}+x_{0,n}+x_{1,n-1}+x_{1,n} \\ x_{2,1}+x_{2,2}+x_{3,1}+x_{3,2} & x_{2,3}+x_{2,4}+x_{3,3}+x_{3,4} & \cdots & x_{2,n-1}+x_{2,n}+x_{3,n-1}+x_{3,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m-2,1}+x_{m-2,2}+x_{m-1,1}+x_{m-1,2} & x_{m-2,3}+x_{m-2,4}+x_{m-1,3}+x_{m-1,4} & \cdots & x_{m-2,n-2}+x_{m-1,n-1}+x_{m-1,n-2}+x_{m-1,n-1} \end{Bmatrix}, \quad (3.5)$$

Зображення (3.2) та (3.3) сформовані першою ПЗЗ-лінійкою, (3.4) та (3.5) другою. В результаті суміщення елементів цих матриць одержимо матрицю $y_{i,j}$ розміром 2n x 2m в інтервалах 0...2n-1 і 0...2m-1:

$$y_{i,j} = \begin{Bmatrix} Y1_{0,0} & Y4_{0,0} & Y1_{0,1} & Y4_{0,1} & \dots & Y4_{0,n-1} \\ Y2_{0,0} & Y3_{0,0} & Y2_{0,1} & Y3_{0,1} & \dots & Y3_{0,n-1} \\ Y1_{1,0} & Y4_{1,0} & Y1_{1,1} & Y4_{1,1} & \dots & Y4_{1,n-1} \\ Y2_{1,0} & Y3_{1,0} & Y2_{1,1} & Y3_{1,1} & \dots & Y3_{1,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y2_{m-1,0} & Y3_{m-1,0} & Y2_{m-1,1} & Y3_{m-1,1} & \dots & Y3_{m-1,n-1} \end{Bmatrix}. \quad (3.6)$$

Це формування, на відміну від [3, 4] не потребує виконання арифметичних операцій, а саме додавання та віднімання, що дає можливість формування високороздільного зображення безпосередньо на борту КА, в режимі реального часу, шляхом формування високороздільного зображення на основі зчитаних значень інтенсивності пікселів з кожної лінійки. Високороздільне зображення, при запропонованому підході, буде готове до передачі через радіоканал одразу після закінчення сканування.

Якщо, поділити спектри зображення (3.6) на спектр (3.1) то можна отримати функцію ФРТ системи субпіксельної обробки: [62]

$$ФРТ = \frac{ШПФ(y)}{ШПФ(x)}, \quad (3.7)$$

де *ШПФ* – швидке перетворення Фур'є.

Це відповідає проходженню сигналу (3.6) через нерекурсивний фільтр з імпульсною реакцією: [62]

$$ФРТ_{i,j} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{Bmatrix}. \quad (3.8)$$

Отже, процес формування зображення можна представити у вигляді згортки:

$$y_{i,j} = x_{i,j} \otimes ФРТ_{i,j}. \tag{3.9}$$

На рис. 3.7 приведена розрахована ФРТ, яка обмежує роздільну здатність.

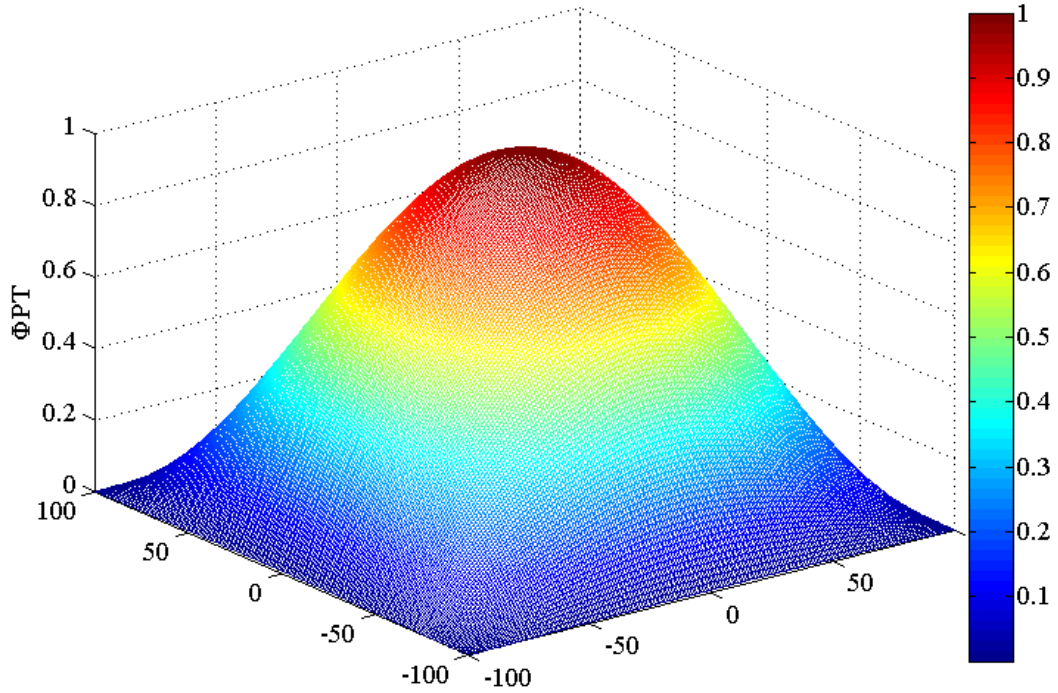


Рисунок 3.7 – Функція ФРТ яка обмежує роздільну здатність сформованого зображення при субпіксельній обробці

Деконволюцію (відновлення) у частотній області одержимо як

$$z_{i,j} = \mathrm{Re}\left(ЗШПФ\left(\frac{y_{i,j}}{ФРТ_{i,j}} \right) \right), \tag{3.10}$$

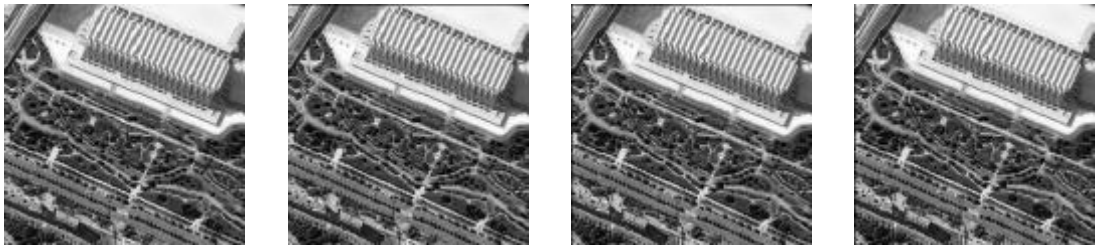
де ЗШПФ – зворотне ШПФ,

Re – операція виділення дійсної частини.

Розглянемо приклад відновлення зображень на основі удосконаленої моделі процесу субпіксельного формування зображень. Для тесту оберемо тестове зображення розміром 240x240 пікселів (рис. 3.8).

Рисунок 3.8 – Тестове зображення (240х240 пкс.)

В результаті розрахунку (3.2 – 3.5) отримаємо серію з 4 низькороздільних зображень:



Y1 *Y2* *Y3* *Y4*

Рисунок 3.9 – Низькороздільні зображення (в реальних умовах сформовані двома ПЗЗ-лінійками)(120х120пкс)

Проведемо суміщення відліків зображень *Y1-Y4* для отримання високороздільного зображення (240х240 пкс.) згідно (3.6):

Рисунок 3.10 – Сформоване високороздільне зображення (240х240 пкс.)

Для оцінки якості сформованого зображення розрахуємо нормоване середньоквадратичне відхилення між сформованим зображенням та тестовим (2.29).

В результаті нормоване середньоквадратичне відхилення (NMSE) становить 14,61%. Природно, що просте сполучення чотирьох зсунутих на половину пікселя матриць не дає можливості значно підвищити роздільну здатність. Для цього після суміщення потрібно виконати зворотну згортку (деконволюцію) за (3.10). Використаємо інверсну фільтрацію [7] для проведення деконволюції. В результаті моделювання отримано відновлене зображення (рис. 3.11). Нормоване середньоквадратичне відхилення між відновленим та тестовим зображеннями практично рівне нулю, тобто отримано зображення яке відповідає тестовому зображенню (3.8) з якого формувалися низькороздільні зображення, що дає право судити про підвищення роздільної здатності у 2 рази, відносно низькороздільних зображень, в ідеальних умовах.

Рисунок 3.11 – Відновлене високороздільне зображення (240x240 пкс.)

3.3. Вибір методу фільтрації при відновленні зображень

В процесі субпіксельного формування зображень для підвищення його якості першочерговим завданням є фільтрація шумів системи та впливу апертури пікселя та інших факторів розглянутих у розділі 2.

Найчастіше використовується два способи усунення впливу апертури пікселя: [87]

- апаратний – накладання апертурної маски; [5]
- програмний – використання вторинної обробки зображень. [7]

Розглянемо перший спосіб [5]. Зменшуючи величину апертури пікселя, можна збільшувати ступінь фільтрації зовнішнього світла. Для цього використовується апертурна маска. Представляє вона собою чорний лист з певного матеріали, з отворами певного діаметру, над кожним пікселем. Таким чином при оптимальному виборі діаметру отворів вплив апертури пікселя вдається компенсувати. При цьому зменшується вплив сусідніх деталей зображення. Кожний отвір маски збільшує глибину фокусу і зміщує фокальну площину. Даний спосіб є дещо економічно затратним, тому що потрібно виготовити апертурну маску, що також технологічно є складним. Цього недоліку позбавлені програмні способи усунення впливу апертури пікселя. [87]

Розглянемо другий спосіб. Використання вторинної обробки зображень дозволяє здійснити усунення впливу апертури пікселя без використання апертурної маски. Проте недоліком цього способу є навантаження бортового процесора. У галузі цифрової обробки зображень багато уваги приділяється деконволюції розмитих зображень [8, 14, 33, 39, 53, 54]. Такі зображення покращуються шляхом відновлення (деконволюції), тобто використання вторинної обробки. Існує багато методів деконволюції зображень, зокрема лінійні та нелінійні. До лінійних методів відносяться: [7]

- інверсна фільтрація;
- оптимальна вінерівська фільтрація;
- регуляризація Тихонова.

До нелінійних методів відносяться: [7]

- сліпа деконволюція;
- алгоритм Ван-Циттера;
- метод Люсі-Річардсона.

3.3.1. Інверсна фільтрація

Перехідна характеристика інверсного фільтра:

$$W(u,v) = 1/H(u,v), \tag{3.11}$$

де *H(u,v)* – спотворюючи функція,

u,v – просторові частоти

Вихідне рівняння в області просторових частот

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) + N(u,v), \tag{3.12}$$

де *F(u,v)* – сформоване зображення,

N(u,v) – шум спостереження.

Згідно (3.11) і (3.12):

$$\hat{F}(u,v) = W(u,v)G(u,v). \tag{3.13}$$

Відновлене зображення $\hat{F}(u,v)$ рівне сумі сформованого зображення *F(u,v)* і шуму спостереження *N(u,v)*, що пройшов через інверсний фільтр. При відсутності шуму досягається майже точне відновлення інверсним фільтром вихідного зображення. Інверсна фільтрація являє собою фільтр з зворотнім зв’язком, тому при однократній дії імпульсу завади, він з'являється на виході фільтра багаторазово. Тому ця завада спотворює зображення, якби маскуючи його. Зміна значення лише одного пікселя зображення приводить до спотворень, представлених на рис. 3.12.

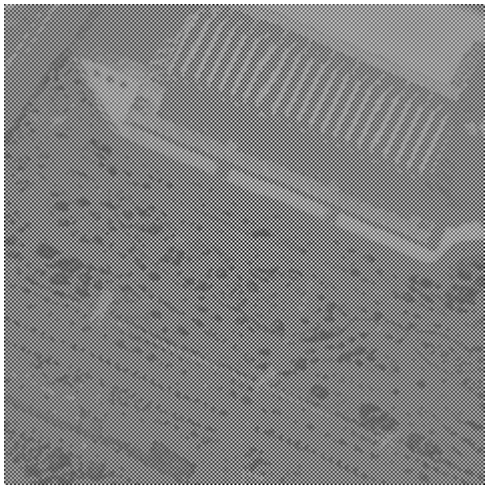


Рисунок 3.12 – Оцінка завадостійкості інверсної фільтрації

Недоліками інверсної фільтрації є те, що при наявності шумів, які переважно є широкосмуговими ніж корисний сигнал, використання інверсного фільтра приводить до значного підсилення шумової складової. Тому є актуальним вибір інших більш завадостійких методів фільтрації при відновленні зображень.

3.3.2. Оптимальна фільтрація

При синтезі оптимального фільтра враховується апріорна інформація про потужність спектральної щільності сигналу зображення та шуму. Тому такий фільтр менш схильний до впливу шумів та нулів передавальної функції системи формування.

Передавальна функція оптимального фільтра [69]:

$$W(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} \cdot \frac{H(\omega)^2}{|H(\omega)|^2 + S_n(\omega) / S_f(\omega)}. \qquad (3.14)$$

Спростивши вираз (3.15) отримаємо:

$$W(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + S_n(\omega) / S_f(\omega)}, \qquad (3.15)$$

де $H^*(\omega)$ – комплексно-спряжена функція $H(\omega)$;

$|H(\omega)|^2 = H(\omega)H^*(\omega)$ – квадрат модуля спотворюючої функції;

$S_n(\omega) = |N(\omega)|^2$ – енергетичний спектр шуму;

$S_f(\omega) = |F(\omega)|^2$ – енергетичний спектр неспотвореного зображення.

Фільтр, представлений виразом (3.15), часто називають фільтром мінімального середньоквадратичного відхилення або фільтром Вінера, а метод фільтрації – оптимальною фільтрацією за Вінером.[7]

З співвідношення (3.15) спектр зображення відновленого фільтром Вінера визначатиметься виразом:

$$\hat{F}(\omega) = W(\omega) \cdot G(\omega) = \left| \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + S_n(\omega) / S_f(\omega)} \right| \cdot G(\omega). \qquad (3.16)$$

Якщо, шум в системі формування рівний нулю, то його енергетичний спектр очевидно теж буде рівним нулю, і як видно з виразу (3.14) вінерівська фільтрація в цьому випадку зводитиметься до інверсної фільтрації.

Проте, незважаючи на всі переваги фільтра Вінера в порівнянні з інверсним фільтром він має один суттєвий недолік, який полягає в тому, що для успішної роботи фільтра, як вже згадувалось, потрібні емпіричні дані про спектр шуму та спектр неспотвореного зображення. Коли ми маємо справу з білим шумом, спектр якого $|N(\omega)|^2$ є постійною функцією (спектр шуму рівномірний в усій смузі частот), відбувається відповідне спрощення. Проте, однаково достовірна апріорна інформація про спектр неспотвореного зображення у більшості випадків невідома.

3.3.3. Метод регуляризації А. Н. Тихонова

Метод регуляризації, який запропонований А.Н. Тихоновим, дозволяє відновлювати зображення без емпіричних даних про спектр шуму та спектр неспотвореного зображення, в цьому є його перевага у застосуванні у реальних системах перед оптимальною фільтрацією для якої ці дані потрібні. Отже для відновлення зображень використаємо регуляризацію Тихонова: [45]

$$W(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \alpha Q(\omega)}, \qquad (3.17)$$

де $H^*(\omega)$ – комплексно-спряжена функція $H(\omega)$;

$Q(\omega)$ – функція регуляризації;

α – параметр регуляризації.

В [7] вказано, що як стабілізуючу функцію $Q(\omega)$ ($Q(u,v)$) в більшості випадків можна використати вираз (3.18), графік якої зображений на рис. 3.13.

$$Q(u,v) = u^2 + v^2. \qquad (3.18)$$

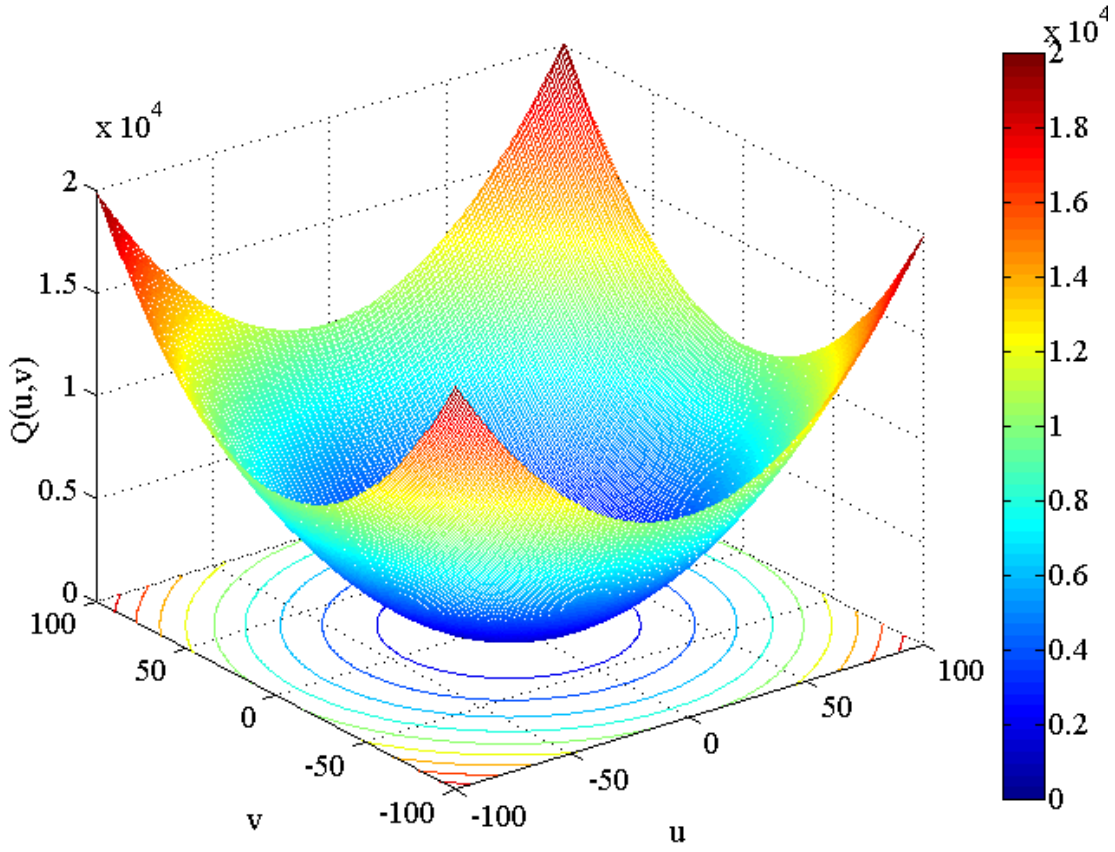


Рисунок. 3.13 – Стабілізуюча функція *Q(u,v)*

Процес формування зображення в частотній області описується так: [7, 14]

$$G(u,v)=H(u,v)F(u,v)+H(u,v)F(u+0.5,v)+ \\ +H(u,v)F(u,v+0.5)+H(u,v)F(u+0.5,v+0.5)+N(u,v). \quad (3.19)$$

Після застосування регуляризації Тихонова на спектр комбінованого зображення отримується відновлене зображення (3.20):

$$\hat{F}(u,v)=\frac{H^{*}(u,v)}{|H(u,v)|^{2}+\alpha|Q(u,v)|^{2}}G(u,v), \quad (3.20)$$

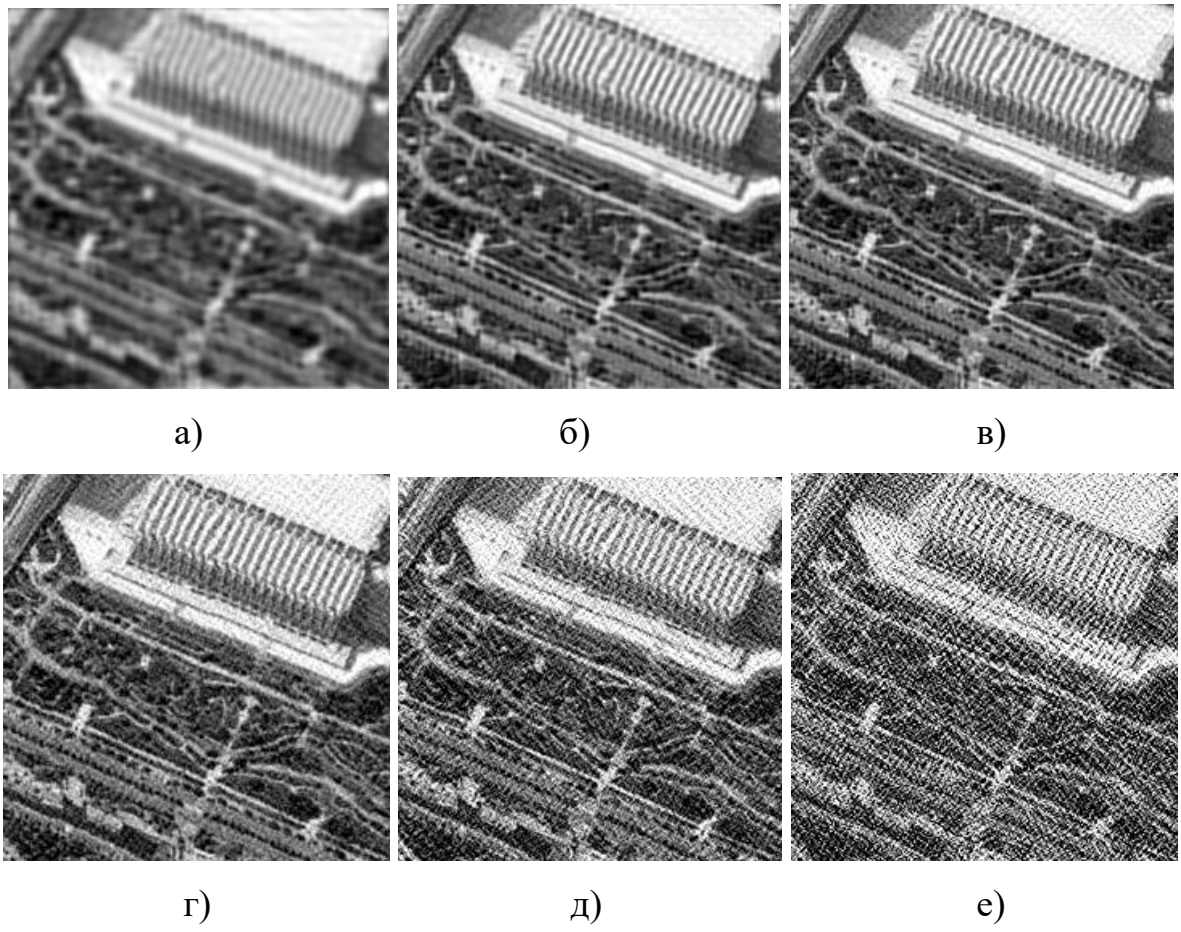
де *Q(u,v)* – функція регуляризації в області просторових частот *u,v*;

Значення параметру регуляризації підбирається для одержання найкращої якості відновлення. Оптимальним значенням є значення, при якому середньоквадратична похибка відновлення, яка розрахована згідно (2.29) є близькою до мінімальної.

Таблиця 3.1

Залежність похибки відновлення від коефіцієнта регуляризації *α*

Значення α	$1\cdot10^{-8}$	$1\cdot10^{-10}$	$1\cdot10^{-11}$	$1\cdot10^{-12}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-14}$
Похибка відновленого зображення в %	21,08	12,29	10,97	14,81	30,62	59,97



а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 3.14 – Відновлене зображення при різних значеннях регуляризації α:
а) $1\cdot10^{-8}$; б) $1\cdot10^{-10}$; в) $1\cdot10^{-11}$; г) $1\cdot10^{-12}$; д) $1\cdot10^{-13}$; е) $1\cdot10^{-14}$

Регуляризація Тихонова дозволяє відновлювати зображення при наявності шуму, але вимагає правильного вибору коефіцієнту регуляризації α.

3.4. Процес обробки зображень з врахуванням впливу апертури пікселя

На рис. 3.15 представлено блок-схему процесу формування зображень з врахуванням впливу апертури пікселя. В структурі сканера присутні дві ПЗЗ-

лінійки, фізично одна лінійка зсунута на половину пікселя відносно іншої, кожна з лінійок (ПЗЗ1 та ПЗЗ2) формують по два зображення, як згадувалося в п.3.2. На виході двох лінійок ми отримаємо сигнали чотирьох зображень з впливом шуму та апертурної функції (ФРТ). Далі сигнали поступають на блок субпіксельної обробки (БСО). Згідно алгоритму тут формується комбіноване зображення підвищеної роздільної здатності, яке поступає на блок відновлення з використанням функції апертури пікселя ФРТ шляхом фільтрації сигналів з використанням регуляризації Тихонова.

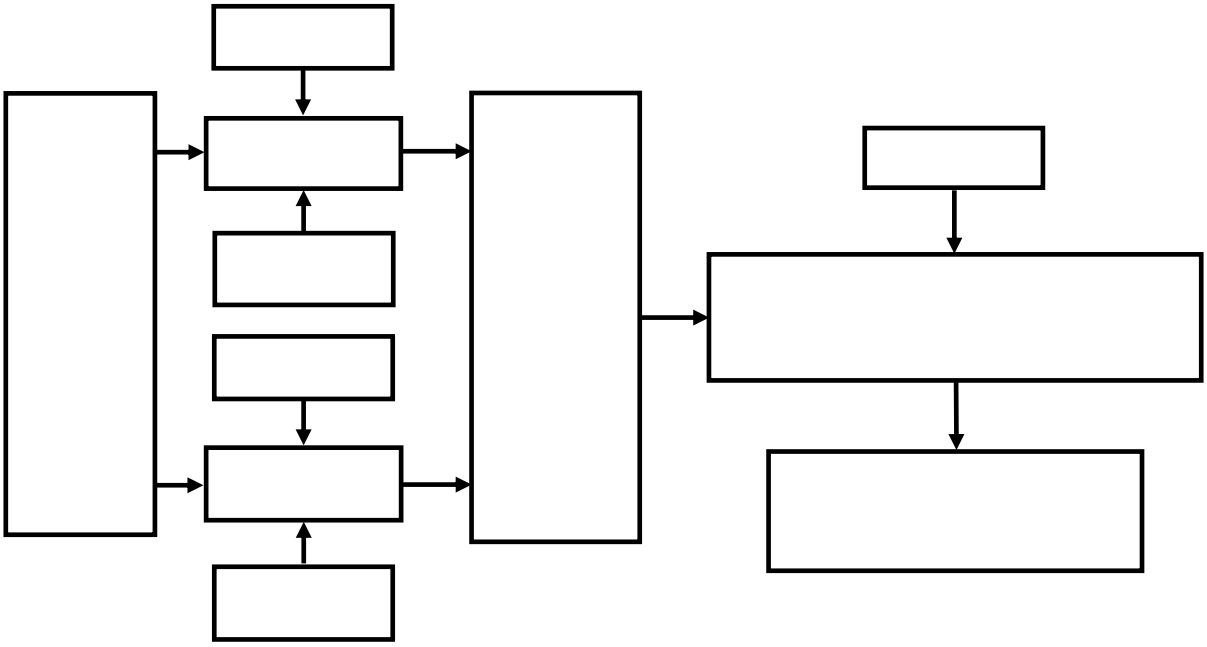


Рисунок 3.15 – Блок-схема процесу субпіксельного формування зображення з урахуванням впливу апертури пікселя

Для ілюстрації ефективності субпіксельної обробки зображень проведено моделювання та усунення впливу апертури пікселя (4 форми), в першому випадку не використовуючи алгоритму субпіксельної обробки, використовуючи одне зображення розміром n x m, в другому випадку використовуючи алгоритм субпіксельної обробки, запропонованого в п.3.2. Результати моделювання показані на рис. 3.16, рис. 3.17 та рис. 3.18.

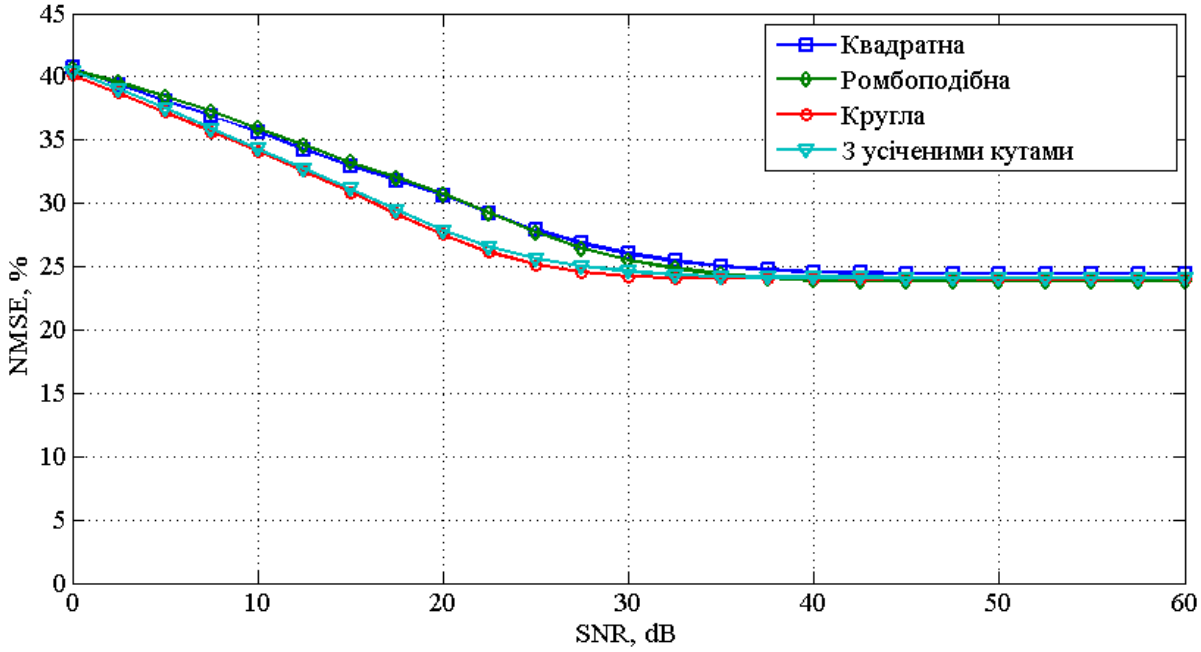


Рисунок 3.16 – Залежність середньоквадратичного відхилення значень інтенсивності пікселів сформованого зображення розміром nxm від ідеального для різних значень відношення сигнал/шум для різних форм апертури пікселів без субпіксельної обробки зображень.

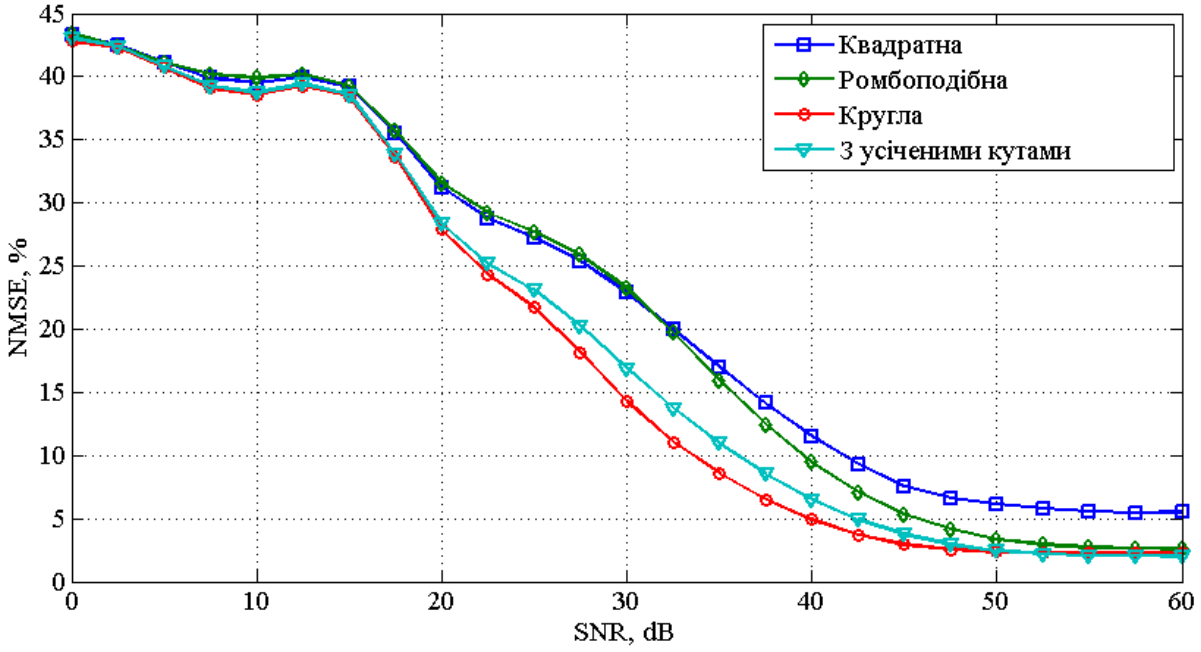


Рисунок 3.17 – Залежність середньоквадратичного відхилення значень інтенсивності пікселів сформованого зображення від ідеального для різних значень відношення сигнал/шум для різних форм апертури пікселів при субпіксельній обробці зображень.

Порівнюючи графіки на рис. 3.16 і рис. 3.17, видно що різниця між значеннями графіків значна, особливо ви високих значеннях відношення сигнал/шум. Припустимо, що використовується 16 стадій накопичення ФП з ЧЗН CCD8091, тоді згідно з табл. 1.6 значення відношення сигнал/шум, для низької освітленості, становить 145, тобто 43,2 Дб. Як видно з рис. 3.16 середньоквадратичне відхилення, при цьому значенні відношення сигнал/шум, становить, наприклад, для апертури з усіченими кутами 24,14%. А при використанні субпіксельної обробки, рис. 3.17, ця похибка становить 4,4%. Отже вдалося зменшити значення нормованого середньоквадратичного відхилення в 5,48 разів.

Як видно з рис. 3.17 найкращі результати дає апертура з круглою формою, для значення відношення сигнал/шум 43,2 Дб, значення NMSE = 3,5%, для апертури з усіченими кутами NMSE = 4,4%, для квадратної NMSE = 8,6%.

Проведено дослідження якості відновлення зображення при відношення сигнал/шум 40 дБ. Результати дослідження показані на рис. 3.18.

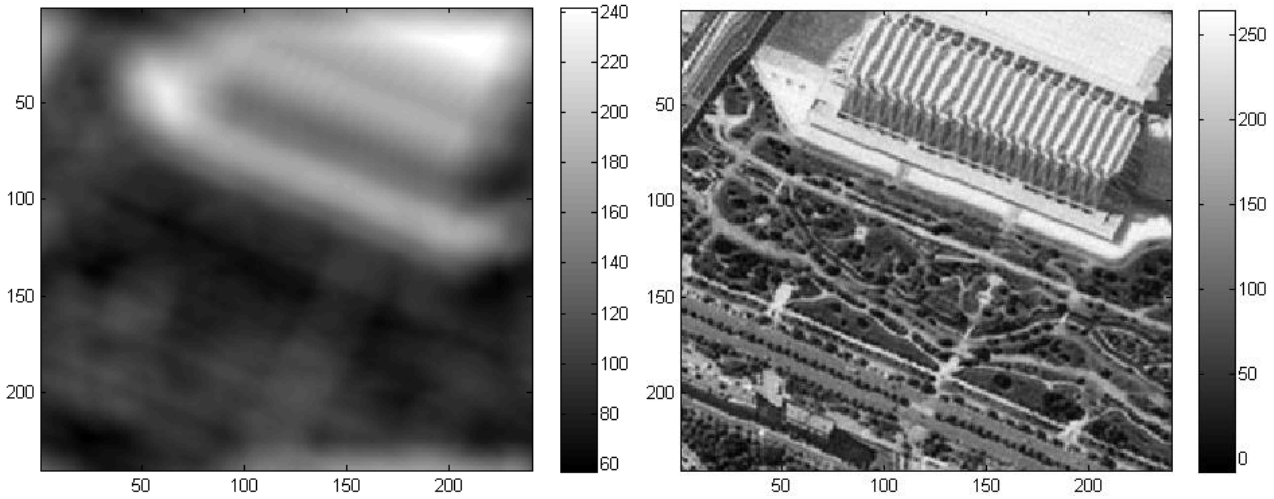


Рисунок 3.18 – а) спотворене зображення апертурною функцією пікселя з усіченими кутами; б) відновлене зображення при SNR 40

3.5. Оцінка роздільної здатності відновлених зображень з усуненням впливу апертури пікселя на основі тестової міри

До традиційних тест-об'єктів оцінки роздільної здатності об’єктів на зображеннях належать ахроматичні міри заданого контрасту з рівномірною спектральною характеристикою: штрихова міра, радіальна міра та інші [9].

Для одержання числової характеристики якості зображення використано радіальну міру. В результаті моделювання процесу субпіксельного формування зображень, отримано зображення, які показані на рис. 3.19.

а) б) в)

Рисунок 3.19 – Тестове зображення: а) 1 низькороздільне зображення; б) комбіноване зображення; в) результат після деконволюції

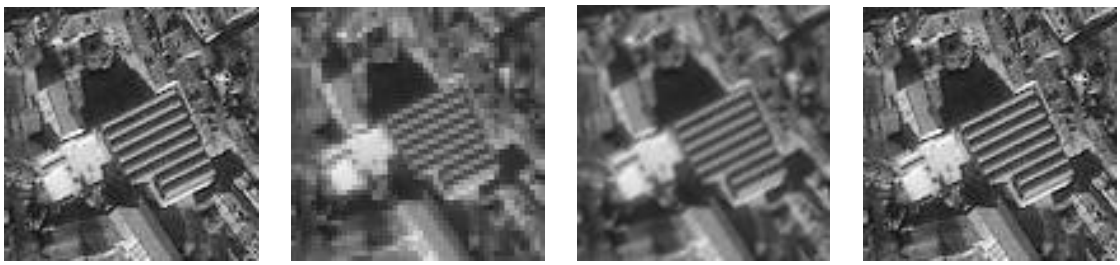
З отриманих зображень можна отримати значення роздільної здатності системи R [мм$^{-1}$], знаходячи значення діаметру кола розсіювання d [мм]. Для розрахунків використаємо (1.3) та (1.5), знайдемо роздільну здатність системи R_0 та роздільну здатність на місцевості P.

Розрахуємо роздільну здатність на місцевості P для конкретного випадку: висота зйомки H = 490 км, фокусна відстань оптичної системи f_0' = 2260 мм, число секторів тестового зображення N_k = 144. Розрахунки проведено для чотирьох форм апертур, для низькороздільного зображення, після процесу субпіксельної обробки, та процесу відновлення. Результати приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розраховані параметри зображень при SNR=40 Дб

Форма апертури пікселя	Параметр	Для низько-роздільного зображення	Для сформованого зображення із субпікс. оброб.	Для зображення із субп. оброб. з вик. фільтрації
Квадратна	d_k, mm	2200	2000	1100
	R_0, mm^{-1}	0,0208	0,0229	0,0417
	P, m	3,69	3,36	1,84
Ромбоподібна	d_k, mm	2280	2080	1150
	R_0, mm^{-1}	0,020	0,022	0,0398
	P, m	3,83	3,49	1,93
Кругла	d_k, mm	1940	1760	970
	R_0, mm^{-1}	0,024	0,026	0,0473
	P, m	3,26	2,95	1,62
З усіченими кутами	d_k, mm	1980	1800	990
	R_0, mm^{-1}	0,023	0,0255	0,0463
	P, m	3,32	3,02	1,66



а) б) в) г)

Рисунок 3.20 – Представлення якості зображень на різних етапах обробки: а) тестове зображення; б) низькороздільне зображення; в) сформоване зображення; г) зображення після використання фільтрації

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що використання субпіксельної обробки зображень із фільтрацією та регуляризацією Тихонова збільшує роздільну здатність в середньому в 1,9-2

рази, а проста субпіксельна обробка зображень без відновлення в 1,14 раз. Для ілюстрації приведено результат відновлення на рис. 3.20.

3.6. Підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень. Вибір оптимального методу комплексування зображень

Під багатоспектральним комплексуванням зображень (multispectral image fusion, pansharpening) розуміємо процес, який дає можливість підвищити роздільну здатність багатоспектрального зображення (видимого спектру, теплового [75]) за рахунок панхроматичного зображення [1, 21, 27, 37, 38, 52, 60, 81, 89]. Зображення панхроматичного каналу, як правило, мають високу просторову роздільну здатність, а багатоспектрального – низьку. Наприклад для супутника QuickBird-2: роздільна здатність панхроматичного каналу – 0,65 метра, а багатоспектрального 2,6 метра [1].

Процедура формування багатоспектрального зображення високої роздільної здатності складається з наступних етапів [21,86]:

- Перетворення багатоспектрального зображення низької роздільної здатності з базису червоний-зелений-синій (RGB) в трикоординатний базис, в якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості і може бути замінена панхроматичним зображенням.
- Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного зображення, після цього проводиться процедура інтерполяції, наприклад метод найближчого сусіда, білінійна, біквадратична, бікубічна інтерполяція, B-сплайн інтерполяція.
- Заміна компонентів яскравості перетвореного зображення панхроматичним зображенням з високою роздільною здатністю.
- Зворотне перетворення в базис RGB.

Далі проведено аналіз існуючих алгоритмів та проведено їх моделювання. Для моделювання вибрано зображення (рис. 3.21) з супутника QuickBird-2.

а б

Рисунок 3.21 – Тестові зображення: а – багатоспектральне зображення (3 канали: синій, зелений, червоний; роздільна здатність 10,4 м.); б – панхроматичне зображення (роздільна здатність 2,6 м.)

Для підвищення роздільної здатності багатоспектральних кольорових зображень за рахунок панхроматичного каналу розроблено багато методів, наприклад:

- метод прямого синтезу зображення [21];
- метод зваженого усереднення [1];
- перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість (Intensity – Hue – Saturation IHS) [60];
- синтез на основі методу головних компонентів (Principal Component Analysis PCA) [1];
- метод арифметичних комбінацій на основі перетворення Брові [103];
- перетворення Грама-Шмідта [1];
- на основі вейвлет - перетворень [103].

Метод прямого синтезу зображення полягає у заміні даних, які відповідають інтенсивності одного з багатоспектральних каналів, даними

панхроматичного каналу високої роздільної здатності [21]. Перевагою цього методу є проста реалізація, недоліком – порушення колірності зображення.

При реалізації зваженого усереднення проводиться масштабування багатоспектрального зображення до розмірів панхроматичного. Після цього кожний елемент результуючого зображення обчислюється за формулою:[1]

$$F_{i,j} = wP_{i,j} + (w-1)M'_{i,j}, \tag{3.21}$$

де w – ваговий коефіцієнт;

F – результуюче зображення;

P – панхроматичне зображення;

M – багатоспектральне зображення.

При використанні методу перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість кольорове зображення з базису RGB трансформується в три окремих зображення, кожне з яких має характеристики – інтенсивності (I), відтінків кольорів (H), насиченості (S). IHS - перетворення описується наступними відношеннями [60]:

$$I = R + G + B$$

$$S = 1 - \frac{3 \cdot \min(R,G,B)}{I}$$

$$H = \begin{cases} 2 - \arccos\left\{ \dfrac{(R-G)+(R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-G)(G-B)}} \right\} & ,B > G \\ \arccos\left\{ \dfrac{(R-G)+(R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-G)(G-B)}} \right\}, & B \le G \end{cases}, \tag{3.22}$$

де I, H, S – значення інтенсивності (яскравості) пікселя в каналах інтенсивність-відтінок-насиченість;

R, G, B – значення яскравості пікселя зображень в спектральних каналах.

Основними етапами цього методу є трансформація кольорового зображення з базису RGB в базис IHS, заміна компоненту I (інтенсивність)

компонентами панхроматичного зображення високої роздільної здатності, зворотна трансформація замінених компонентів з базису IHS в RGB базис для отримання комплексованого зображення високої роздільної здатності [60,86].

На рис. 3.22 а зображено результат комплексування багатоспектрального та панхроматичного зображень для методу IHS.

а б

Рисунок 3.22 – Результат комплексування: а – для методу IHS; б – для методу на основі PCA

Даний метод незначно спотворює передачу кольору.

Синтез на основі методу головних компонентів (Principal Component Analysis PCA) являє собою трансформацію, на протязі якої взаємно корельовані смуги багатоспектрального зображення конвертуються в новий набір некорельованих компонент. Перший компонент цього набору замінюють панхроматичним каналом, який має високу роздільну здатність, після чого виконується зворотне PCA-перетворення. На рис. 3.22 б зображено результат комплексування багатоспектрального та панхроматичного зображень для методу на основі PCA.

Перетворення Брові засноване на спектральному моделюванні. Дане перетворення використовує метод, в якому значення яскравості кожного

пікселя багатоспектрального зображення множиться на відношення значення яскравості відповідного пікселя панхроматичного зображення до суми яскравостей всіх каналів багатоспектрального зображення.

$$R' = \frac{R}{(R+G+B+N)} \cdot P, \qquad G' = \frac{G}{(R+G+B+N)} \cdot P,$$

$$B' = \frac{B}{(R+G+B+N)} \cdot P, \qquad N' = \frac{N}{(R+G+B+N)} \cdot P, \qquad (3.23)$$

де R, G, B, N – значення інтенсивностей спектральних каналів з низькою роздільною здатністю;

R', G', B', N' – значення інтенсивностей спектральних каналів сформованого мультиспектрального зображення з високою роздільною здатністю; P – значення інтенсивностей пікселів панхроматичного зображення [103].

На рис. 3.23 а зображено результат комплексування багатоспектрального та панхроматичного зображень для методу на основі перетворення Брові.

а б

Рисунок 3.23 – Результат комплексування: а – для методу Брові; б – для методу реалізації дискретного вейвлет-перетворення

При цьому передбачається, що спектральний діапазон панхроматичного зображення відповідає спектральному діапазону багатоспектрального зображення.

Перетворення Грама-Шмідта розроблено для отримання ортогональних каналів із каналів з відомою кореляцією. Наприклад для трьох каналів RGB коефіцієнти кореляції:

$$\rho_{RG} = E\left[R,G\right], \quad \rho_{GB} = E\left[G,B\right], \quad \rho_{RB} = E\left[R,B\right]. \qquad (3.24)$$

Першим кроком у цьому методі є створення зображення панхроматичного каналу з низькою роздільною здатністю шляхом обчислення середнього зваженого багатоспектральних каналів. Далі, ці канали декорелюються з використанням алгоритму ортогоналізації Грама-Шмідта, при цьому кожен канал вважається одним багатовимірним вектором. Цей змодельований панхроматичний канал з низькою роздільною здатністю використовується в якості першого вектора. В подальшому він замінюється панхроматичним каналом з високою роздільною здатністю, що дає можливість сформувати багатоспектральне зображення високої роздільної здатності [86].

Реалізація дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) за Хааром здійснюється наступним чином: виконуючи ДВП над об'єктом *P*, одержуємо об'єкт *P′*; об'єкт *M* масштабується до розміру *P* за допомогою апроксимації, утворюючи об'єкт *M′*; проміжний результат отримуємо шляхом заміни коефіцієнтів апроксимації *P′* на *M′*. На завершення виконується зворотне ДВП, отримуючи результат зображений на рис.3.23 б.

В табл. 3.3 представлено результати обробки тестових зображень і фрагментів реальних космічних знімків та розраховано ряд метрик, що дає можливість визначити методи, які забезпечують підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення та вносять найменше спотворення передачі кольору.

Таблиця 3.3

Якісні показники якості формування багатоспектральних зображень для різних методів

	IHS	PCA	Brovey	Вейвлет-перетворення
Час виконання алгоритму	206,5 мс.	348,7 мс.	99,9 мс.	1542,6 мс.
ERGAS	0,0201	0,0281	0,0307	0,0443
SAM	1,9413	1,3481	1,7612	5,8496
RMSE, %	1,3121	1,8394	2,0034	2,8933
SSIM	0,899	0,6647	0,8851	0,9767
NMSE, %	18,98	32,5987	24,4087	15,5773
EME	18,4613	9,1845	21,5082	17,8094

Найкращу швидкодію має метод Брові, багатоспектральне зображення з розміром 1000x1000 пікселів формується за 99,9 мс., на комп'ютері з такими параметрами: процесор AMD A10-6800K з тактовою частотою 4,4 ГГц, чотири фізичних ядра, розмір доступної оперативної пам'яті складає 7,19 ГБ. Під час розрахунки метрики ERGAS (Relative Dimensionless Glabal Error) – відносна безрозмірна глобальна помилка, найменшу похибку дав метод IHS. Найменше значення SAM (Spectral Angle Mapper) дав метод PCA. SAM – це метод оцінки відповідності спектра еталонного зображення та сформованого, в ідеальному випадку коли два зображення одинакові, то SAM = 0. RMSE (Root Mean Square Error) – це корінь з середньоквадратичного відхилення сформованого від еталонного зображення, NMSE (Normalised Mean Square Error) – нормоване середньоквадратичне відхилення (2.29). SSIM (structure similarity) – це індекс структурної подібності, або кореляції (4.3). EME (enhancement measurement error) – дозволяє оцінити якість багатоспектрального зображення без еталона, що дає переваги над іншими вищезгаданими метриками, оскільки в реальних

умовах еталонне зображення відсутнє. Чим краща якість зображення тим більше значення EME.

Аналізуючи дані з табл. 3.3 зроблено висновок, що найкраще застосовувати метод арифметичних комбінацій на основі перетворення Брові, оскільки він має найкращу швидкодію, та найбільше значення метрики EME. В загальному хороші результати дав метод IHS, але його краще використовувати коли не має вимог до швидкодії системи.

Висновки до розділу 3

1. На основі проведеного аналізу показано, що субпіксельне формування зображень в порівнянні з формуванням зображень одинарною ПЗЗ-лінійкою з лінійним розташуванням пікселів та їх однаковими розмірами, має суттєву перевагу.

2. Удосконалено модель субпіксельної обробки зображень, що дозволило зменшити навантаження на бортовий процесор космічного апарату за рахунок зменшення арифметичних операцій (додавання, та віднімання), та показано, що даний метод може підвищити просторову роздільну здатність об’єктів майже в два рази в реальних умовах.

3. Аналіз процесу формування зображення показує, що апертура пікселя діє на нього як просторовий фільтр низьких частот і погіршує просторову роздільну здатність навіть при використанні сучасних методів субпіксельного формування зображень. Вперше оцінено вплив форми апертури пікселя, яка діє на нього як просторовий фільтр низьких частот,чим погіршує якість та просторову роздільну здатність зображень, та запропоновано метод усунення вказаного впливу за допомогою субпіксельного формування зображень та поєднання його з фільтрацією і використанням регуляризації Тихонова.

4. В результаті аналізу виявлено, що найменший вплив на якість формування зображень оказує апертура пікселя круглої форми. Внаслідок

меншої площі пікселя, відносно квадратної, пропонується використовувати багатогранну апертуру пікселя, при якій середньоквадратична похибка формування зображень є більшою ніж у круглої апертури пікселя лише на 0,9%.

5. Промодельовані алгоритми підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, оцінено якість формування зображень ними. Та зроблено висновок, що найкраще застосовувати метод арифметичних комбінацій на основі перетворення Брові, та перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість (IHS).

РОЗДІЛ 4
МЕТОД ТА АЛГОРИТМ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЗАСОБИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

4.1. Метод та алгоритм субпіксельної обробки зображень

На основі результатів, які приведені в попередніх розділах дисертаційної роботи, зроблено висновок, що за допомогою удосконаленої моделі субпіксельної обробки зображень вдається ефективно підвищити роздільну здатність, якість зображення та використовувати об’єктив з меншою фокусною відстанню, порівнюючи з системою з аналогічною роздільною здатністю. Це зменшує вартість та масо-габаритні характеристики системи.

Алгоритм субпіксельної обробки зображень, запропонований в розділі 3 приведений блок діаграмою на рис. 4.1 та на рис. 4.2. В загальному процес формування зображення полягає у перетворені аналогових сигналів ПЗЗ-лінійок у цифровий сигнал, який несе у собі інформацію про значення інтенсивності пікселів. Перетворення аналогових сигналів ПЗЗ-лінійки у цифровий сигнал, проводиться аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), з певною, достатньою, розрядністю. Як згадувалося в 1 розділі дисертації, ПЗЗ-лінійка має свій динамічних діапазон, який залежить від рівня темнового сигналу, та освітлення елементів цієї лінійки. Отже, розрядність повинна бути такою, щоб забезпечити відтворення цього діапазону в цифровому сигналі, наприклад для діапазону 4000, достатньо використати 12-ти бітне АЦП. Цифрові сигнали з АЦП надходять на входи процесорного модуля, в якому, відбувається оцінка рівня завад (шумів) та подальша їх фільтрація. Після фільтрації сформовані двома ПЗЗ-лінійками зображення комбінуються для отримання зображення яке має більшу роздільну здатність. На рис. 4.1 показано блок-схему процесу формування комбінованого зображення *y*, яке відбувається на борту КА. На першому етапі проводиться формування двома ПЗЗ-лінійками,

з ЧЗН, чотирьох зображень, значення пікселів яких використовуються для формування комбінованого зображення *y* у реальному масштабі часу, що дозволяє неперервно передавати комбіноване зображення, рядок за рядком, через радіоканал на наземну станцію. Процес сканування виглядає так: спочатку відбувається формування першої лінії зображення *Y*4, після переміщення лінійки на половину проекції пікселя одночасне формуються лінії зображень *Y*1 та *Y*3, після цього ліній *Y2* та *Y4* зображень, потім знову формуються лінії зображень *Y*1 та *Y*3 і т.д.

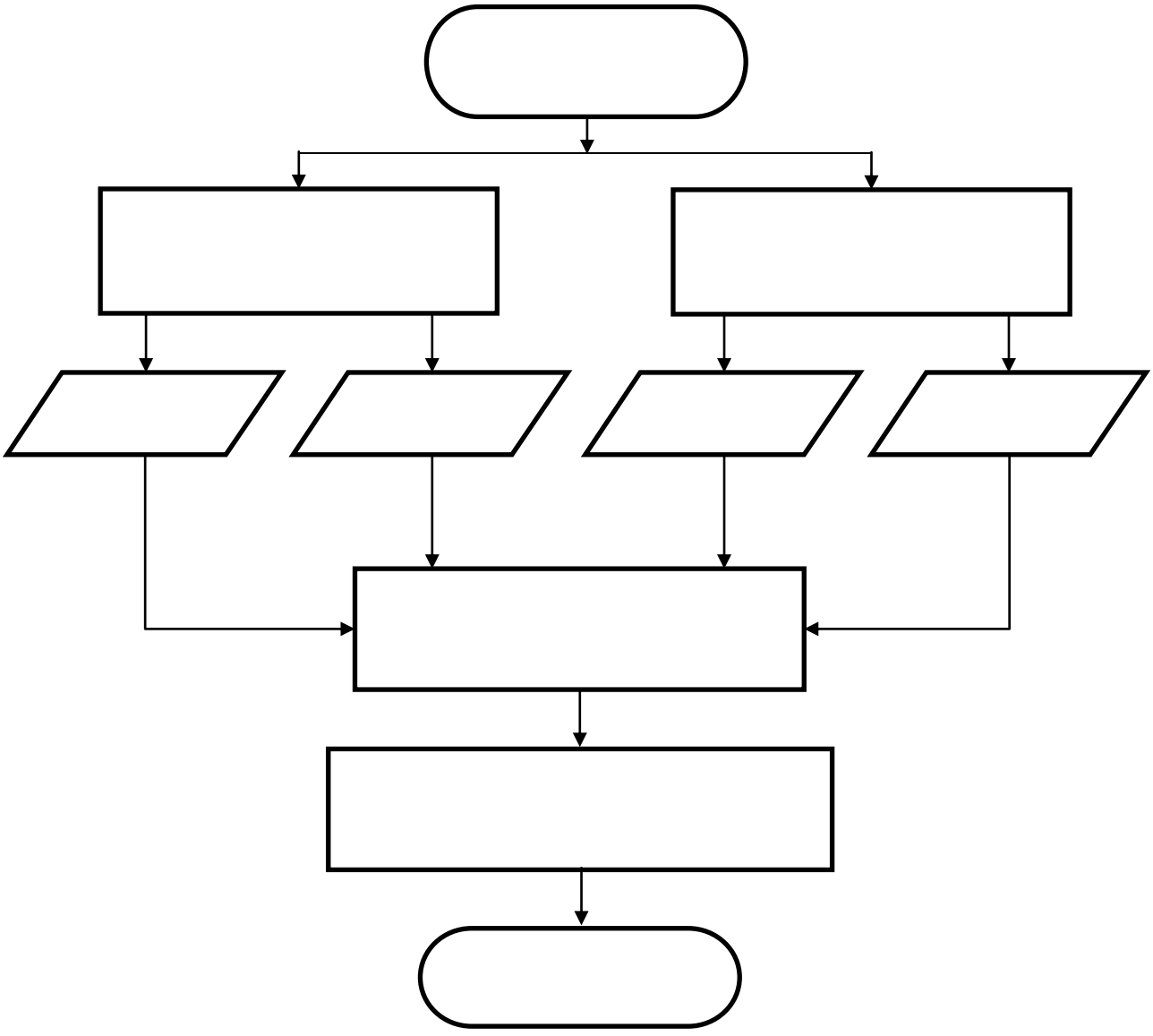


Рисунок 4.1 – Алгоритм субпіксельної обробки зображень для стадії формування на КА

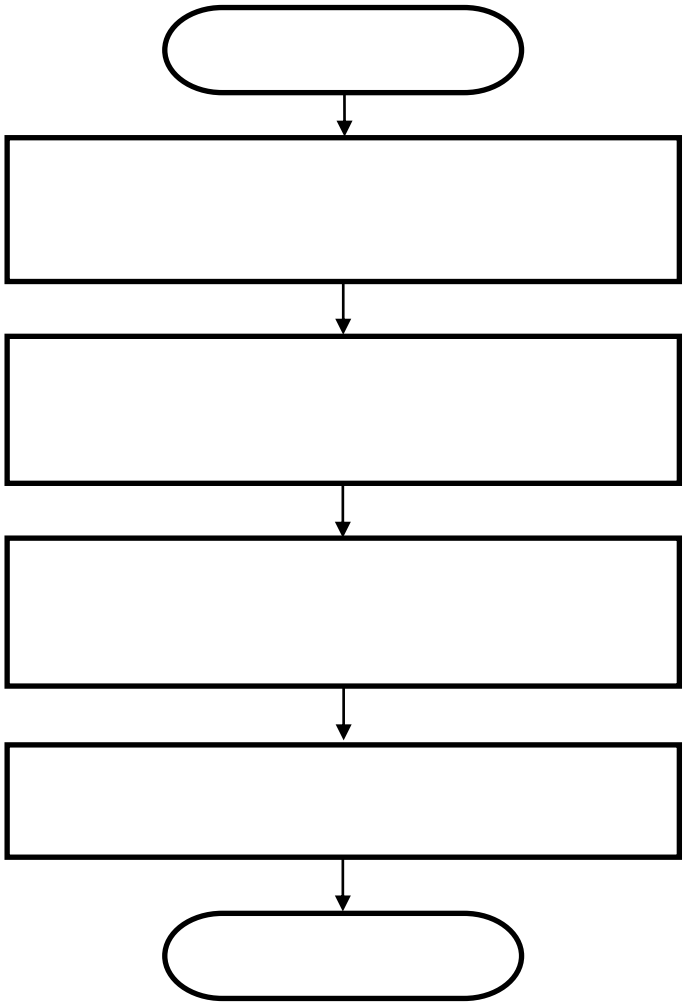


Рисунок 4.2 – Алгоритм субпіксельної обробки зображень на наземній станції

На рис 4.2 зображено алгоритм субпіксельної обробки зображень на наземній станції.

Удосконалений метод субпіксельної обробки зображень реалізується в два етапи. На першому етапі проводиться сканування та формування чотирьох зображень двома ПЗЗ-лінійками. Після цього значення пікселів комбінуються, згідно (3.6), в комбіноване зображення *y*. Наступним етапом методу є усунення впливу імпульсного відгуку системи субпіксельного формування зображення (рис. 2.7). Після цього усувається впливу апертури пікселя та параметрів руху КА. Сформоване зображення сканером КА виглядає:

$$I(i,j) = S \cdot D\left\{ I(x,y) \oplus h(x,y) \cdot M_{\Sigma}(x,y) + N(x,y) \right\}, \qquad (4.1)$$

де *h(x,y)* – функція апертури пікселя;

$M_{\Sigma}(x,y)$ – результуюча МПФ системи.

Для усунення факторів впливу на роздільну здатність, в запропонованому методі використовується інверсна фільтрація з регуляризацією Тихонова. Для якої важливим завданням є підбір оптимального значення параметра регуляризації α. Під час моделювання (маючи тестове зображення (еталон)), це значення можна знаходити шляхом знаходження мінімального значення середньоквадратичного відхилення між відновленим зображенням та еталоном. Але в реальності еталону ми не маємо, тому потрібно використовувати інший критерій для оцінки якості зображення без еталонного зображення. Для цього використаємо різницевий критерій, запропонований Злобіним В.К. и Єремеєвим В.В [17]. Різницевий критерій заснований на тому, що при підвищенні роздільної здатності зображення підвищується амплітуда перепадів яскравості між сусідніми елементами зображення:

$$Rk = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(y(i,j)-y(i+1,j)\right)^2}{2MN-M-N} + \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(y(i,j)-y(i,j+1)\right)^2}{2MN-M-N} \quad (4.2)$$

Оптимальне значення коефіцієнта резуляризації вибирається по максимуму значення *Rk*. Процесу підбору оптимального значення коефіцієнта регуляризації проводиться наступним чином:

- проводиться розрахунок значень *Rk* для 19 значень коефіцієнта регуляризації в діапазоні: 10^{-9}, 10^{-8} ..10^{9};
- вибір діапазону з максимальним значенням *Rk* (або з мінімальним значенням NMSE);
- розрахунок відновленого зображення для 100 значеь α в діапазоні отриманому в попередньому пункті, та розрахунок значень *Rk* для цих випадків;
- вибір максимального значення *Rk* (чи з мінімального значення NMSE або максимального значення EME) при цьому отримаємо оптимальне значення коефіцієнта регуляризації α;

- відновлення зображення з оптимальним коефіцієнтом регуляризації отриманим в попередньому пункті.

Підбір оптимального α потребує великих обчислювальних потужностей чи тривалого часу, тому виконувати його в реальному часі на борту КА практично не можливо.

4.2. Тестування методу та алгоритму субпіксельної обробки зображень

Оскільки процес відновлення зображення y, переданого з КА, пропонується виконувати на земній станції, то його потрібно передати з високою точністю для забезпечення найкращої якості відновлення. В реальних системах ДЗЗ завжди присутній шум, який може впливати на якість передачі даних. Для оцінки цього впливу проведемо моделювання передачі зображення через радіоканал. Для оцінки якості передачі цифрових даних через канал існує параметр який називається відношенням біт-помилка (BER). Даний параметр є відношенням обсягу неправильно прийнятої інформації до загального обсягу переданої інформації, вираженої в бітах. Подібно відношенню потужностей сигнал/шум вимоги до величини відношення біт/помилка залежать від типу систем та вимог до них. Під час моделювання проведено усунення апертури пікселя а також результуючої МПФ системи, вони усуваються одночасно, тому, що апертурна функція пікселя є складовою результуючої МПФ системи, але для оцінки впливу на якість зображення різних форм пікселя її винесено з результуючої МПФ.

Для моделювання приймемо, систему радіозв'язку з фазовою маніпуляцією – PSK (phase shift keying), що зараз широко використовується в комерційній і військовій системах зв'язку. Приймемо, що значення градацій яскравості пікселя становить 1024, тобто при переведенні в двійкову систему – 1111111111 (на кожне значення пікселя припадає 10 біт). Також припустимо, що система без завадостійкого кодування з двійковою фазовою маніпуляцією

BPSK (binary phase shift keying). Для цього випадку на рис. 4.3 приведена залежність імовірності бітової помилки (BE) від E_b/N_0 (дБ), де E_b – енергія біта, а N_0 - спектральна щільність потужності шуму [44].

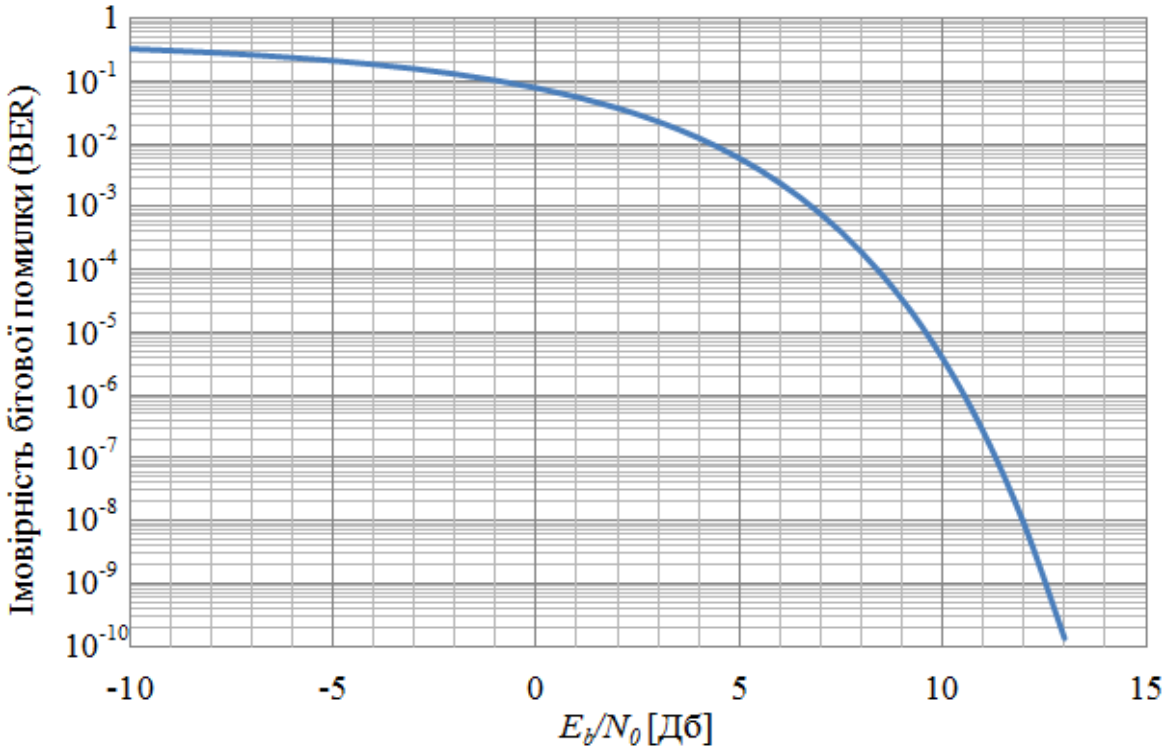


Рисунок 4.3 – Залежність імовірності бітової помилки (BE) від E_b/N_0 (Дб)

Відношення E_b/N_0 повністю збігається з відношенням потужностей сигнал/шум для аналогових сигналів:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P}{N}\left(\frac{W}{R}\right) = \frac{P}{N_0}\cdot\frac{1}{R} = \frac{P}{N}, \qquad (4.3)$$

де P – потужність сигналу, N – потужність шуму, W – ширина спектра сигналу, R – швидкість передачі (біт/с). Типові значення прийнятного відношення сигнал/шум становлять близько 11 Дб при імовірності бітової помилки 10^{-7}. Значення імовірності бітової помилки 10^{-7} означає, що на 10 млн. бітів припадає 1 хибний біт. Наприклад, в зображенні розміром 9216x9216 пкс. з бітністю – 10 буде 85 хибних бітів.

Оцінимо завадостійкість запропонованого алгоритму в п. 3.2. Побудуємо залежності середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від тестового, від BER та E_b/N_0 .

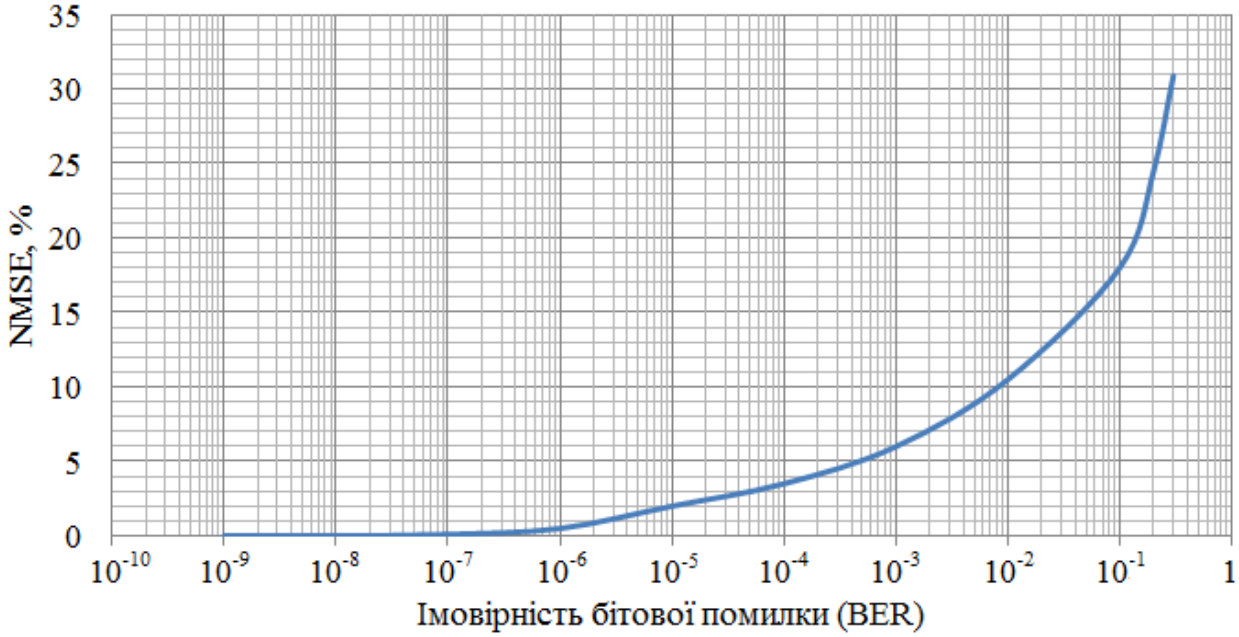


Рисунок 4.4 – Залежність середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від ідеального від значення імовірності бітової помилки

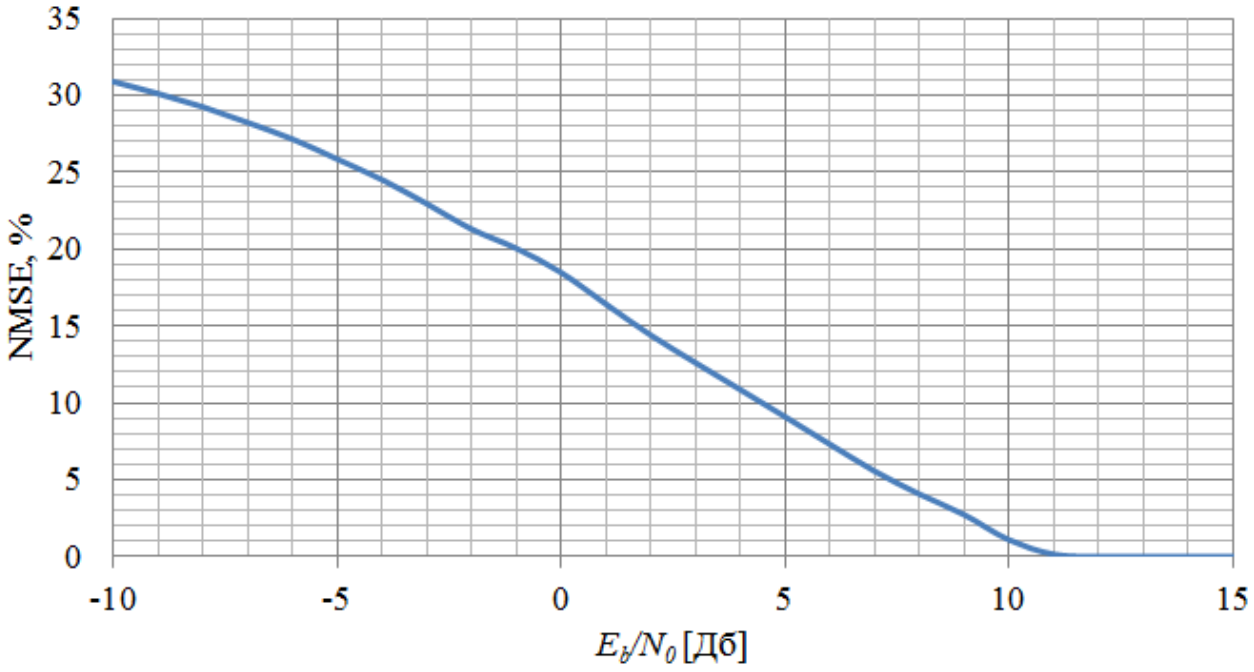
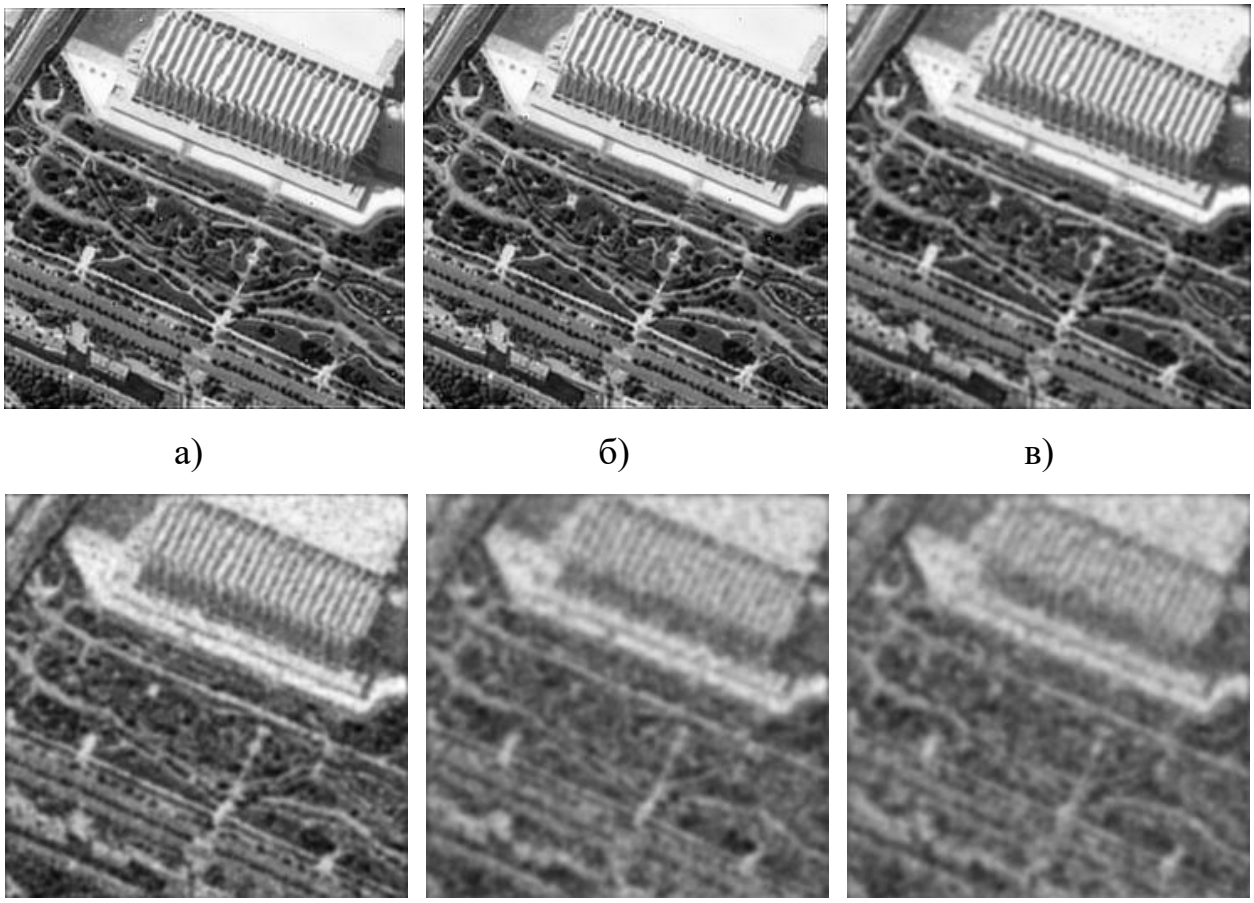


Рисунок 4.5 – Залежність середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від ідеального від E_b/N_0

Для забезпечення достовірності результату, кожна точка графіка розрахована 1000 разів, оскільки помилка може попасти на молодший біт, а може і на старший. Якщо на старший, то середньоквадратичне відхилення буде більшим.



а) б) в)

г) д) е)

Рисунок 4.6 – Зображення відновлення: а) при E_b/N_0 = 12 Дб (BER=10^{-8}); б) при E_b/N_0 = 8 Дб (BER=$2\cdot10^{-4}$); в) при E_b/N_0 = 4 Дб (BER=10^{-2}); г) при E_b/N_0 = 0 Дб(BER=$8\cdot10^{-2}$); д) при E_b/N_0 = -4 Дб (BER=$2\cdot10^{-1}$); е) при E_b/N_0 = -8 Дб (BER=$2{,}5\cdot10^{-1}$)

Порівняємо запропонований метод, з відомим методом, запропонованим в [3, 4]. Він також дозволяє підвищити роздільну здатність в 2 рази шляхом субпіксельного сканування. Як еталон авторами використана матриця a, з якої формуються 4 підматриці b0, b1, b2 і b3:

$$a = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 5 & 5 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 10 & 10 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 10 & 10 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 5 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad b0 = \begin{pmatrix} 4 & 30 & 11 & 0 \\ 5 & 30 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad b1 = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 4 & 0 \\ 6 & 40 & 14 & 0 \\ 2 & 10 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$b2 = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 9 & 0 \\ 0 & 26 & 34 & 0 \\ 0 & 7 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad b3 = \begin{pmatrix} 0 & 19 & 26 & 0 \\ 0 & 20 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

На основі підматриць b0-b3 формується відновлена матриця A. Якщо підматриці b0-b3 передаються по радіоканалу без шумів, то еталонна матриця a і відновлена A, повністю збігаються. Змоделюємо вплив імовірності бітової помилки на якість формування зображення з підвищеною роздільною здатністю, розраховуючи значення NMSE для різних значень імовірності бітової помилки.

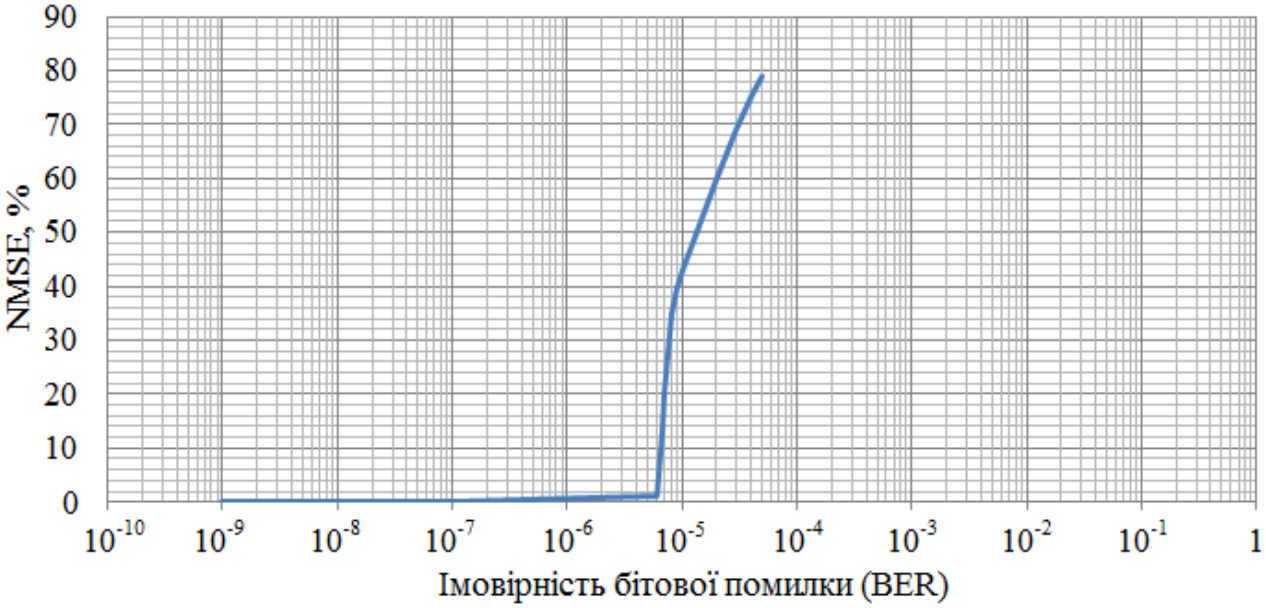
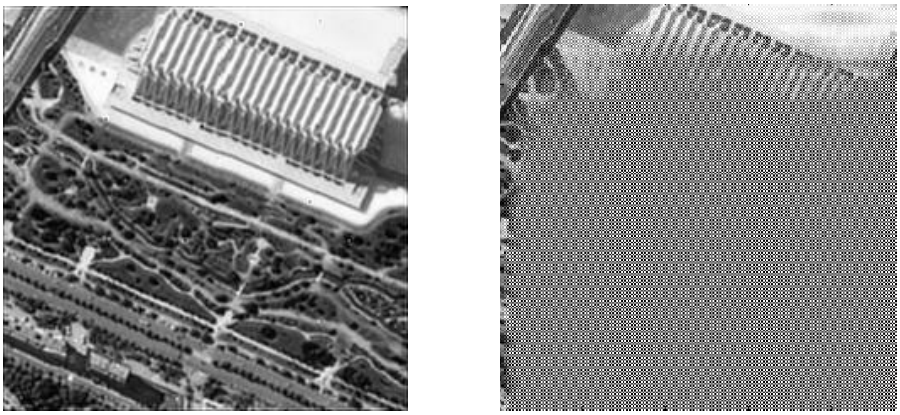


Рисунок 4.7 – Залежність середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від ідеального від BER

Як видно з рис. 4.7 метод втрачає стабільність при значення імовірності бітової помилки $2 \cdot 10^{-5}$. В реальності метод перестає ефективно працювати при

зміні значення інтенсивності одного пікселя, при моделюванні використовувалося зображення 240x240 пкс., тому саме при значенні імовірності бітової помилки $6{,}2\cdot10^{-6}$ з'являється бітова помилка. В реальних системах, коли зображення складається зі 100 млн. пікселів, то навіть при допустимій імовірності бітової помилки 10^{-8}, кількість бітових помилок складатиме: $bit_{error} = 10^{-8}\cdot100\cdot10^{6}\cdot10 = 10$. Отже робимо висновок, що алгоритм в [3, 4] не може правильно працювати при наявності бітових помилок чи навіть власних шумів системи. На рис. 4.8 проілюстровано результати роботи двох алгоритмів при імовірності бітової помилки $2\cdot10^{-4}$.



а) б)

Рисунок 4.8 – Порівняння результатів роботи алгоритмів при BER=$2\cdot10^{-4}$:
а) – запропонований (NMSE = 3%); б) – відомий(NMSE = 94%)

На основі цих результаті можна зробити висновок, що запропонований метод, є набагато завадозахищенішим ніж метод запропонований в [3, 4].

Порівняємо час виконання двох алгоритмів для різних розмірів зображення. Оскільки алгоритм з [3, 4] не враховує вплив апертури пікселя та параметрів руху КА, то для достовірного порівняння час виконання етапу усунення вищевказаних факторів, для запропонованого алгоритму, не враховується. Моделювання проводилося в середовищі MATLAB. Комп'ютер, на базі якого проводилися дослідження, має процесор AMD A10-6800K з тактовою частотою 4,4 ГГц, чотири фізичних ядра, розмір доступної оперативної пам'яті складає 7,19 ГБ.

Таблиця 4.1

Порівняння часу виконання відомого алгоритму та запропонованого

Розмір зображення / Алгоритми	1т.х1т. (1 Мп.)	3т.х3т. (9 Мп.)	6т.х6т. (36 Мп.)	9216х9216 (85 Мп.)	18432х18432 (340 Мп.)
Запропонований	0,287 с.	2,266 с.	10,53 с.	26,54 с.	112,2 с.
Відомий	0,552 с.	4,977 с.	25,31 с.	59,95 с.	248,25 с.

Аналізуючи отримані дані (табл. 4.1) можна зробити висновок, що запропоновані удосконалений метод і алгоритм субпіксельної обробки зображень мають більшу швидкодію чим відомий метод, в середньому в 2,2 рази. Час виконання 2 етапу відновлення, на якому проводиться усунення впливу апертури пікселя та параметрів руху КА, практично рівний часу виконання 1 етапу. Навіть при виконанні двох етапів відновлення виграш по часу виконання алгоритму становить біля 10%.

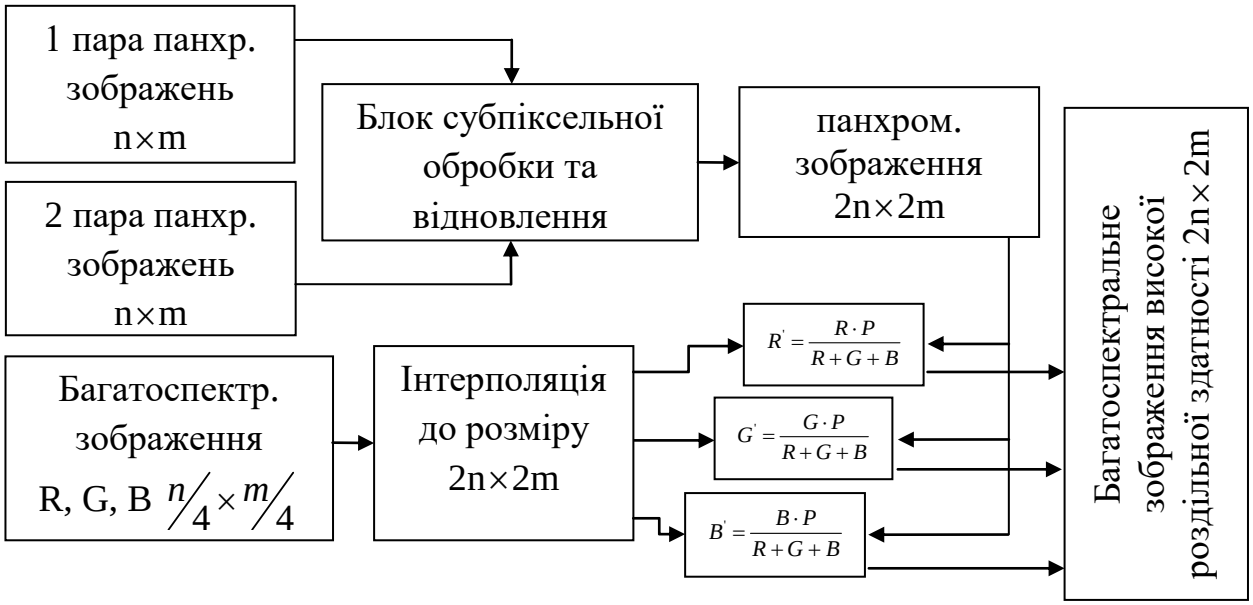
4.3. Використання субпіксельної обробки в методах багатоспектрального комплексування зображень

Для підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень пропонується використати субпіксельну обробку з урахуванням впливу апертури пікселя розглянуту в п. 3.2 [48,62].

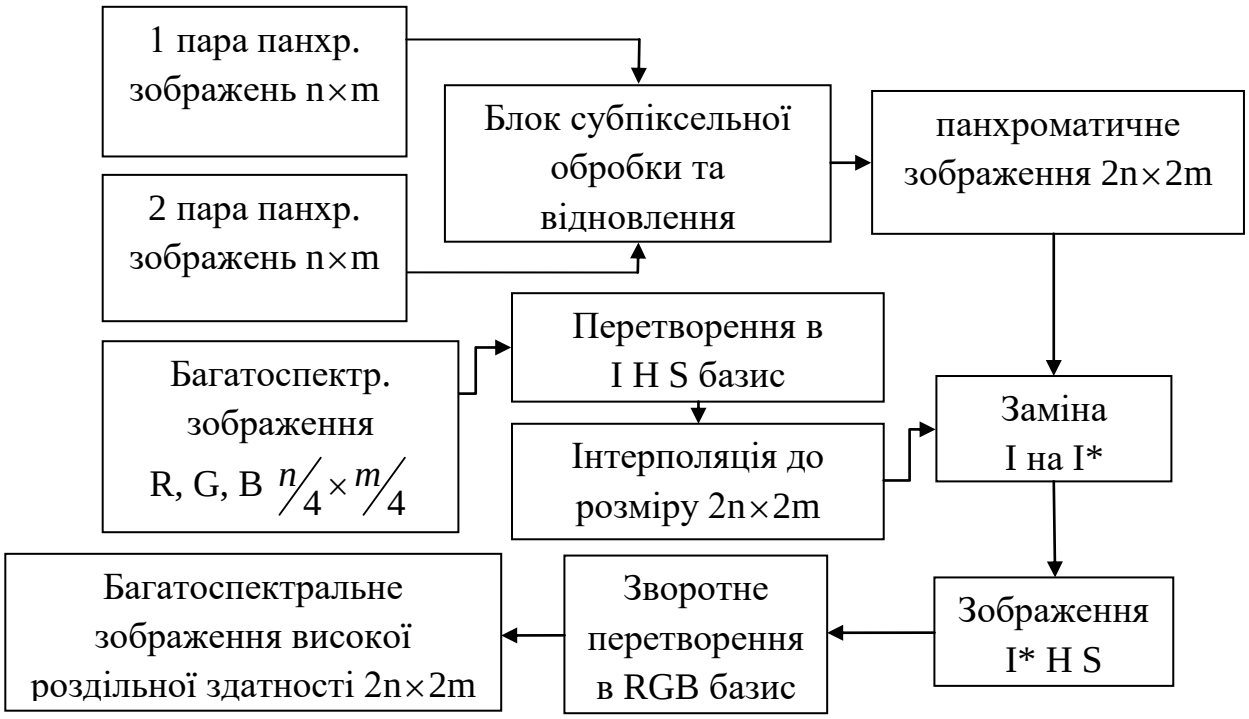
В п. 3.6 проведено дослідження якості підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення, та вибрано два оптимальні методи комплексування зображень – метод Брові та IHS.

На рис. 4.9 зображено синтезовані блок-схеми алгоритмів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням субпіксельної обробки для формування панхроматичного зображення для методів Брові та IHS. Удосконалення даних методів полягає у додатковому підвищенню якості та роздільної здатності зображення панхроматичного каналу за рахунок удосконаленого методу субпіксельної обробки зображень.

Підвищення роздільної здатності панхроматичного зображення, як наслідок – призводить до підвищення якості багатоспектрального зображення. Це дозволяє підвищити розміри зображень з 4 разів до 8.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Блок-схеми алгоритмів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням субпіксельної обробки: а) для методу Брові; б) для перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість (IHS)

4.3.1. Тестування алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень

Для оцінки роздільної здатності багатоспектральних зображень використані нормована середньоквадратична похибка та коефіцієнт кореляції SSIM. NMSE розраховується згідно 2.11. SSIM розраховується наступним чином: [28]

$$SSIM = \left(\frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}\right)\left(\frac{2\overline{X}\,\overline{Y}}{\left(\overline{X}\right)^2 + \left(\overline{Y}\right)^2}\right)\left(\frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}\right), \tag{4.4}$$

$$\overline{X} = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} x_{i,j}, \overline{Y} = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} y_{i,j}, \tag{4.5}$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j} - \overline{X}\right)^2, \tag{4.6}$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(y_{i,j} - \overline{Y}\right)^2, \tag{4.7}$$

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(x_{i,j} - \overline{X}\right)\left(y_{i,j} - \overline{Y}\right), \tag{4.8}$$

де $X = \{x_{i,j}\}$ і $Y = \{y_{i,j}\}$ – порівнювані зображення;

M, N – розміри зображення;

σ_X^2 і σ_Y^2 – дисперсії порівнюваних зображень;

σ_{XY} – коваріація порівнюваних зображень, міра залежності двох випадкових величин.

Панхроматичне зображення розміром 2nx2m (n, m – кількість пікселів зображення одного з давачів) сформоване із чотирьох панхроматичних зображень розміром nxm = 500x500 пікселів за допомогою давачів, зсунутих один відносно другого на половину пікселя. Багатоспектральне зображення

сформоване розміром 125x125 пікселів. В результаті роботи алгоритму сформовано багато спектральне зображення з розміром 1000x1000 пікселів.

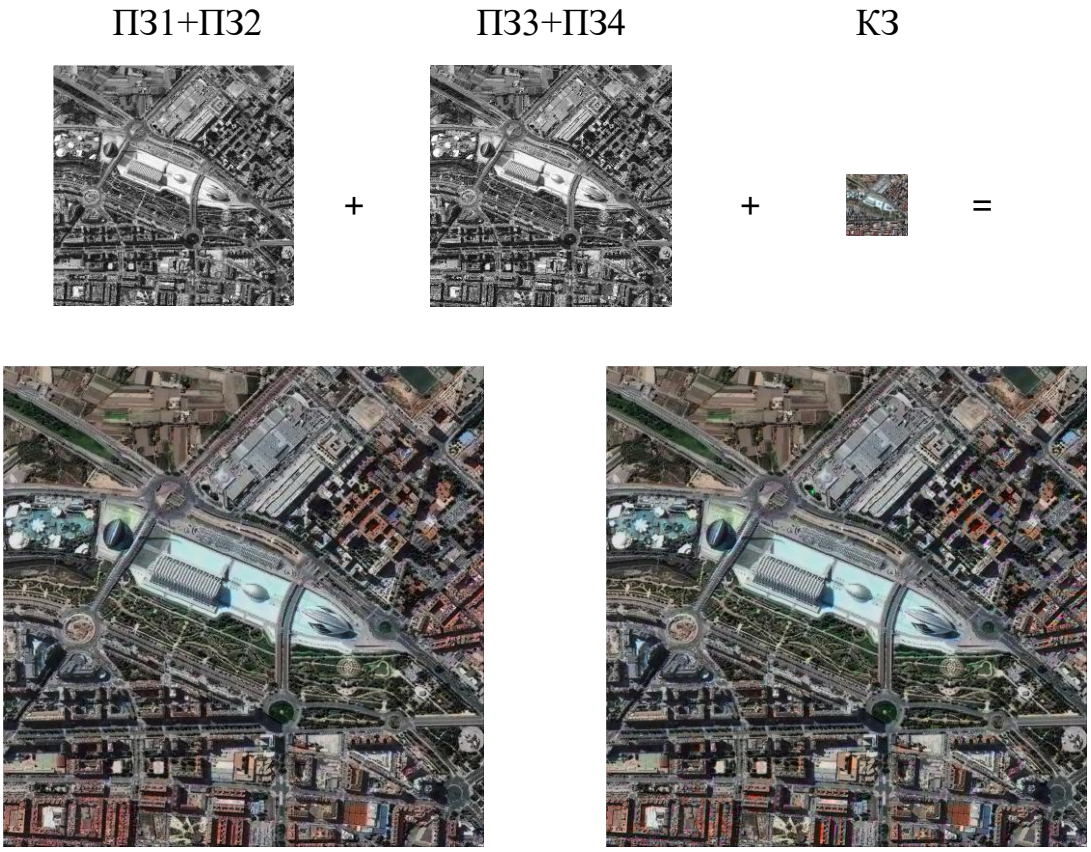
В табл. 4.2 наведені середньоквадратична похибка NMSE формування високороздільного зображення та коефіцієнт кореляції SSIM між тестовим та синтезованим багатоспектральним зображеннями згідно (2.11) та (4.4).

Таблиця 4.2

Значення похибок відновлення зображень при SNR = 40 Дб

Похибка / Метод (зображення)	NMSE, %	SSIM
Метод Брові без субпіксельної обробки	35,09	0,9073
Низькороздільне багатоспектральне зображення	43,45	0,5018
Метод Брові з субпіксельною обробкою	4,23	0,9953
Метод IHS з субпіксельною обробкою	4,53	0,9911

На рис. 4.10 наведені результати роботи двох алгоритмів. В результаті проведення моделювання доведено, що алгоритм на основі методу Брові має більшу швидкодію ніж IHS, а саме: для формування багатоспектрального зображення розміром 1000x1000 пікселів, методом Брові, з чотирьох панхроматичних зображень розміром 500x500 пікселів, та багатоспектрального зображення розміром 125x125 пікселів потрібно 0,32 секунди; а якщо використовувати метод IHS при таких самих умовах, потрібно 0,467 секунди. Таким чином вдалося ефективно підвищити якість та роздільну здатність багатоспектрального зображення при збільшенні останнього за розміром у 8 разів.



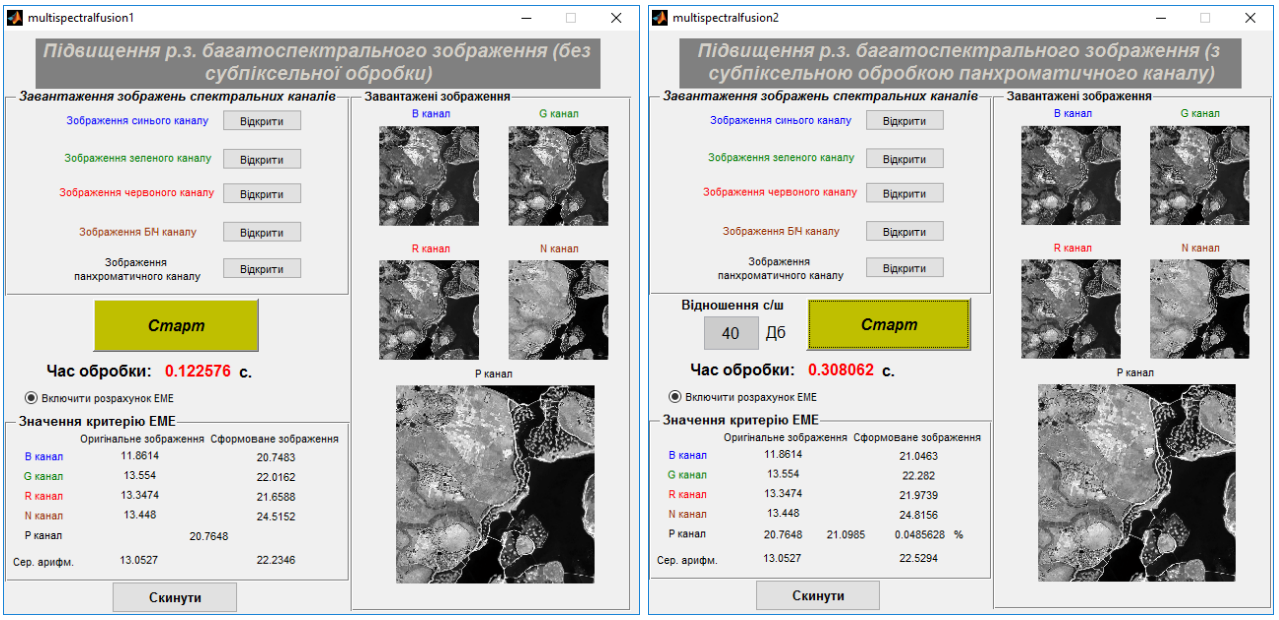
а) б)

Рисунок 4.10 – Сформовані багатоспектральні зображення: а) методом Брові; б) методом IHS; ПЗ1-ПЗ4 – низькороздільні зображення панхроматичного каналу, КЗ – низькороздільне кольорове зображення

Аналізуючи отримані зображення, можна сказати, що якості зображень, отриманих двома методами практично відповідають одна одній.

4.3.2. Програмна реалізація удосконаленого алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення

Для підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення створено окремі програми, головні вікна яких зображено на рис.4.11.



а) б)

Рисунок 4.11 – Головні вікна програм для підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення: а – програмна реалізація методу Брові, б – програмна реалізація удосконаленого методу Брові з субпіксельної обробкою зображення панхроматичного каналу

Для їх роботи потрібно завантажити зображення спектральних каналів та зображення панхроматичного каналу та натиснути на кнопку «Старт», в результаті у вікні програми відобразиться час виконання алгоритму на даному комп’ютері, сформоване високороздільне багатоспектральне зображення, та значення метрики EME для зображень спектральних каналів низькороздільного (вхідного) та високороздільного (сформованого) багатоспектральних зображень.

На даний час у Космічного агентства України не має прикладних пакетів програм для підвищення роздільної здатності багатоспектрального каналу, тому дані програми можуть бути використанні для підвищення роздільної здатності багатоспектрального каналу супутника СІЧ-2М, розробка якого на даний час триває. Роздільна здатність даного супутника буде становити: для панхроматичного каналу – 2,6 м., для багатоспектрального – 8 метрів. Отже для моделювання цього процесу взято зображення з супутника QuickBird, у якого

роздільна здатність панхроматичного каналу становить 0,65 метра; та 2,6 метра – роздільна здатність багатоспектрального. Розмір панхроматичного каналу зменшено в 4 рази, тобто роздільну здатність доведено до 2,6 м, а багатоспектрального зменшено в 3,076923 рази (наприклад з 1000x1000 у 325x325). В результаті змодельовано зображення, які би отримав супутник СІЧ-2М, та проведено підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення до 2,6 метра в запропонованій програмі, та оцінено значення критерію ЕМЕ. Результати подані в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Значення критерію ЕМЕ для оригінального та сформованого багатоспектральних зображень

	Оригінальне зображення зі супутника QuickBird	Сформоване
Синій канал	11,8614	20,7483
Зелений канал	13,554	22,0162
Червоний канал	13,3474	21,6588
Ближній ІЧ	13,448	24,5152
Середнє значення	13,0527	22,2346

Аналізуючи результати з табл. 4.2 можна зробити висновок, що якість багатоспектрального зображення ефективно збільшується, оскільки значення критерію ЕМЕ для сформованого зображення в 1,7 рази більше ніж для оригінального багатоспектрального зображення отриманого супутником.

4.4. Структура та архітектура бортового процесора для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ

В загальному структура бортового процесора для субпіксельної обробки зображень подібна до інших процесорних систем. Але є деякі відмінності. В першу чергу є потрібними функцій прямого та зворотного перетворення Фур'є,

функції роботи з матрицями великих розмірів і т.д. у арифметико-логічному пристрої. Важливим чинником є розмір та швидкодія внутрішньої пам'яті через високу швидкість передачі даних з пристрою вводу даних, отриманих з радіоканалу. Розмір пам'яті вибирається залежно від кількості пікселів на ПЗЗ-лінійках сканера, чим більше пік селів тим більший об'єм потрібен, насамперед для зберігання отриманих з радіоканалу зображень та для можливості роботи алгоритмів.

Як було сказано раніше, повністю весь процес субпіксельної обробки практично не можливо виконувати в реальному масштабі часу. Тому необхідно розділити процеси: процес формування високороздільного зображення (рис. 4.1), який можна виконувати в реальному масштабі часу, на борту КА, шляхом суміщення відліків 4 зображень сформованих двома ПЗЗ-лінійками CCD8091 з ЧЗН; та процес його відновлення на наземній станції.

Принцип ЧЗН використовується для підвищення чутливості та відношення сигнал/шум сенсора, сигнал на виході такої лінійки практично не відрізнятиметься від сигналу простої лінійки. В результаті формування чотирьох зображень розміром 9216x9216 пкс. утвориться, згідно (2.11), комбіноване зображення *y* з розміром 18432x18432 пкс. А процес вторинної обробки (рис. 4.2) виконувати на наземній станції.

Оскільки лінійка CCD8091 має 6 виходів, то можна виконувати зчитування інформації в 6 потоків, максимальна швидкість зчитування одного потоку – 20 Мпікс./с.

На рис. 4.12 зображена спрощена структурна схема апаратури КА для субпіксельної обробки. Основою схеми є блок суміщення відліків, в якому проводиться формування комбінованого зображення з сигналів двох лінійок. Для його побудови пропонується використовувати програмовану логічну матрицю (ПЛМ) [35, 36, 51] Altera Cyclone V, що має швидкісний інтерфейс для видачі потоку інформації до 6,144 Гбіт/с. Це дасть можливість розвантажити

центральний процесор КА. Далі сигнал передається на наземну станцію за допомогою високошвидкісної системи прийому-передачі даних.

В схемі не зазначені аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) та пристрій компенсації фотометричних похибок та темнового сигналу.

В якості АЦП доцільно використати шість двоканальних АЦП AD9231-20. По три мікросхеми на кожну лінійку. Дані аналогово-цифрові перетворювачі забезпечують достатнє відношення сигнал/шум – 71,3 дБ та динамічний діапазон.

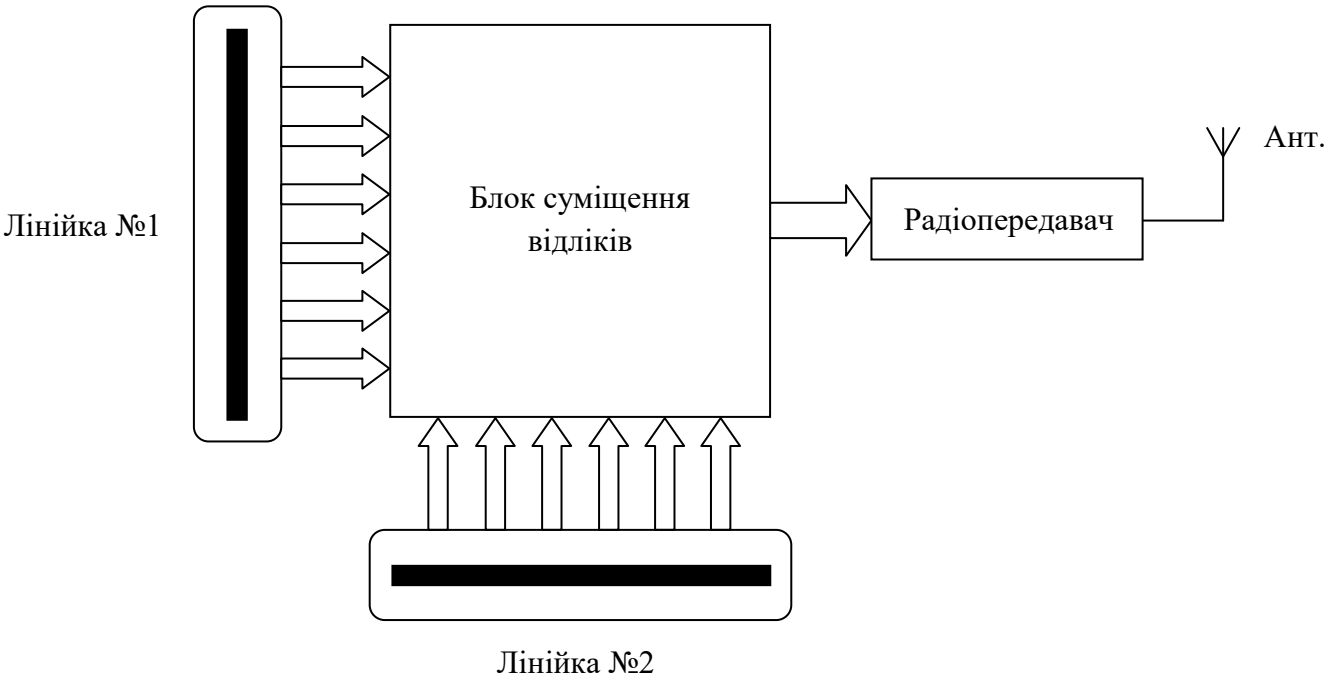


Рисунок 4.12 – Спрощена структурна схема апаратури КА для субпіксельної обробки

Оцінимо потрібну пропускну здатність каналу передачі даних. Наприклад для висоти орбіти КА H= 490 км із (1.15) одержимо значення $V_{ПТ} \approx 7{,}069$ км/с, тоді повний час сканування рядка сцени дорівнює $T_{пов}$=17,48/ 7,069 = 2,473 с. Об’єм даних при 12 бітному двійковому кодуванні зображення розміром 18432х18432 пкс. $Q_Д$ = 12•184322 =4076863488 біт = 3,797 Гбіт. Тобто сформоване зображення об’ємом 3,797 Гбіт потрібно передати за 2,473 с.

Звідки мінімальна пропускна здатність каналу рівна 3,797/2,473 = 1,535 Гбіт/с. Це є досяжним значенням для сучасних систем передачі інформації.

Далі процес вторинної обробки потрібно виконувати на наземній станції. Можливі дві реалізації даних пристроїв. Перша – це розробка та використання спеціального апаратного забезпечення, яке виконує потрібні операції вторинної обробки в автоматичному режимі. На рисунку 4.13 зображено структуру процесора для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ для наземної станції.

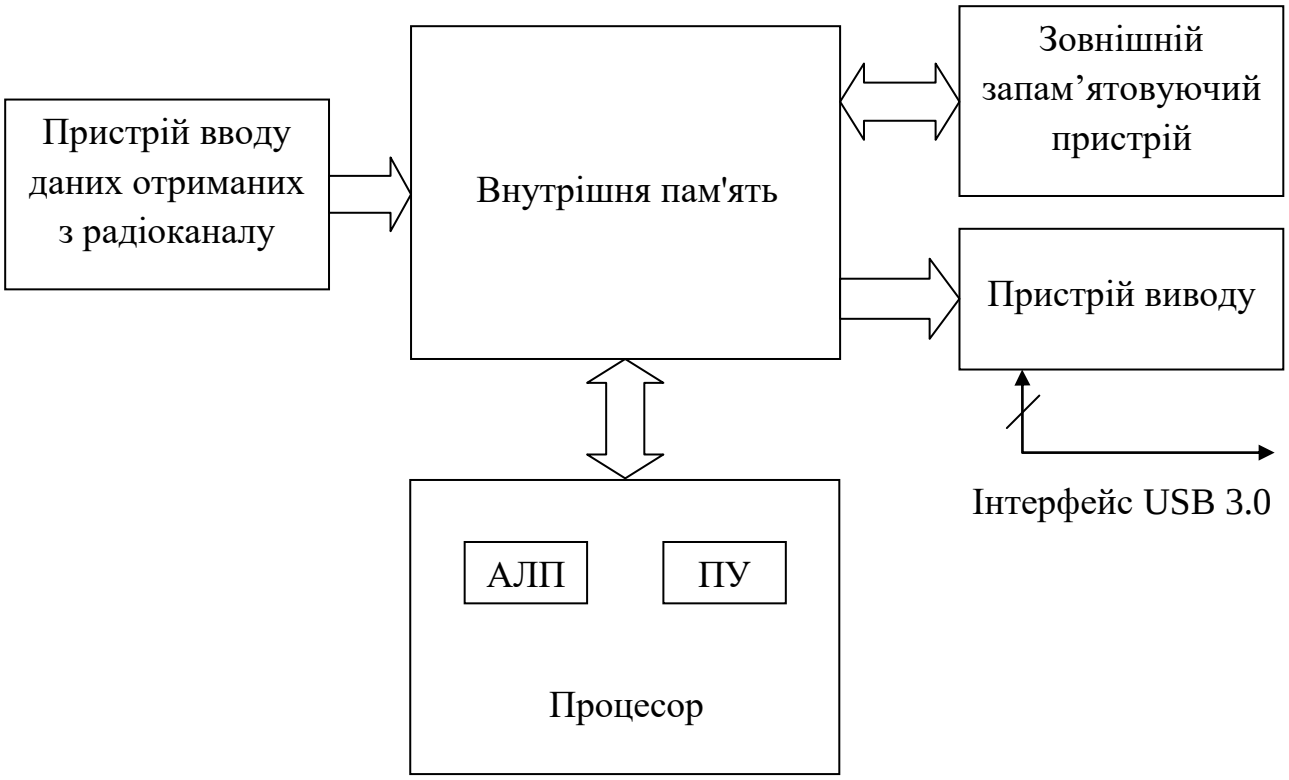


Рисунок 4.13 – Структура та архітектура бортового процесора для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ для наземної станції.

АЛП – арифметико-логічний пристрій;

ПУ – пристрій управління.

Бортовий процесор підключається до комп’ютерної системи через високошвидкісний інтерфейс USB 3.0 або PCI express для подальшого використання за призначенням.

Отриманий сигнал з КА подається відразу через високошвидкісний інтерфейс USB 3.0 в комп’ютерну систему. Одержане зображення відновлюється використовуючи спеціальний програмний комплекс в якому проводяться етапи відновлення (рис. 4.11), підбираються оптимальні коефіцієнти регуляризації для відновлення.

4.5. Розрахунок обчислювальної складності алгоритму

В основному найбільше обчислювальне навантаження несе етап відновлення комбінованого зображення за допомогою інверсної фільтрації з регуляризацією Тихонова.

Оскільки, як було згадано раніше, при запропонованому методі формування комбінованого зображення виконується практично в реальному масштабі часу за допомогою блока суміщення відліків (рис. 4.3), то не має потреби оцінювати швидкодію алгоритму. Формування комбінованого зображення виконується за час сканування ділянки.

Моделювання етапу вторинної обробки велося в середовищі MATLAB [10, 15, 16]. Комп’ютер на базі якого проводилися дослідження, має процесор AMD A10-6800K з тактовою частотою 4,4 ГГц, чотири фізичних ядра, розмір доступної оперативної пам’яті складає 7,19 ГБ.

Тестування двох кроків алгоритму проводилося для різних розмірів зображень 1000x1000 (1 Мпікс.), 3000x3000 (9 Мпікс.), 6000x6000 пікселів (36 Мпікс.), 9216x9216 (85 Мпікс.) та для зображення розміром 18432x18432 пікселів (340 Мпікс.).

Як сказано в п. 4.1. відновлення потрібно проводити в 2 етапи, для усунення впливу імпульсного відгуку системи субпіксельного формування зображення, на першому етапі, та впливу апертури пікселя на другому. При цьому змінюється функція *ФРТ*.

На етапі відновлення сформоване зображення відновлюються за допомогою інверсної фільтрації з регуляризацією Тихонова.

Припустимо, що нам відоме значення коефіцієнта регуляризації, тобто відновлення виконується лише один раз для кожного з етапів. Час виконання етапів буде практично рівним. Результати розрахунків приведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4

Оцінка часу виконання етапів алгоритму

Розмір зображення / Етапи алгоритму	1т.х1т. (1 Мп.)	3т.х3т. (9 Мп.)	6т.х6т. (36 Мп.)	9216х9216 (85 Мп.)	18432х18432 (340 Мп.)
1 етап відновлення	0,287 с.	2,266 с.	10,53 с.	26,54 с.	112,2 с.
2 етап відновлення	0,287 с.	2,266 с.	10,53 с.	26,54 с.	112,2 с.

З таблиці 4.4 видно, що мінімальний час виконання алгоритму для зображення розміром 18432х18432 пікселів, становить 2*112,2 = 225 секунд.
А як згадувалося раніше час сканування сцени, при висоті орбіти 490 км та проекції пікселя на Землю – 1,897 м., дорівнює 2,473 с, отже навіть якщо нам відоме значення параметра регуляризації, нам не вдасться відновити зображення в реальному масштабі часу.

При підборі коефіцієнта регуляризації час звичайно суттєво збільшиться. Самим кращим виходом є відновлення тільки частини комбінованого зображення оскільки в більшості випадків немає необхідності підвищувати роздільну здатність по всьому кадру. Найчастіше потрібно детальніше розглянути його окремі елементи зображення. Тому потрібно виділити потрібну частину зображення, скажімо 512х512 пікселів, та для неї розрахувати оптимальний коефіцієнт регуляризації α і відновити. А якщо припустити, що вплив апертури пікселя, імпульсного відгуку субпіксельного формування та шуму є однорідний по всьому зображенні, то отримане значення коефіцієнта регуляризації є оптимальним і для всього зображення.

Інша ситуація при використанні субпіксельної обробки для аерофотозйомки на борту БПЛА. Проведемо оцінку можливості роботи системи субпіксельної обробки в реальному масштабі часу для аерофотозйомки. Для цього необхідно знайти час сканування сцени. Знайдемо T_{int} – час сканування одного рядка сцени [мс].

$$T_{int} = \frac{P}{V_{ПТ}}, \tag{4.9}$$

де P – бажана роздільна здатність [м];

$V_{ПТ}$ – швидкість польоту системи ДЗЗ [км/с].

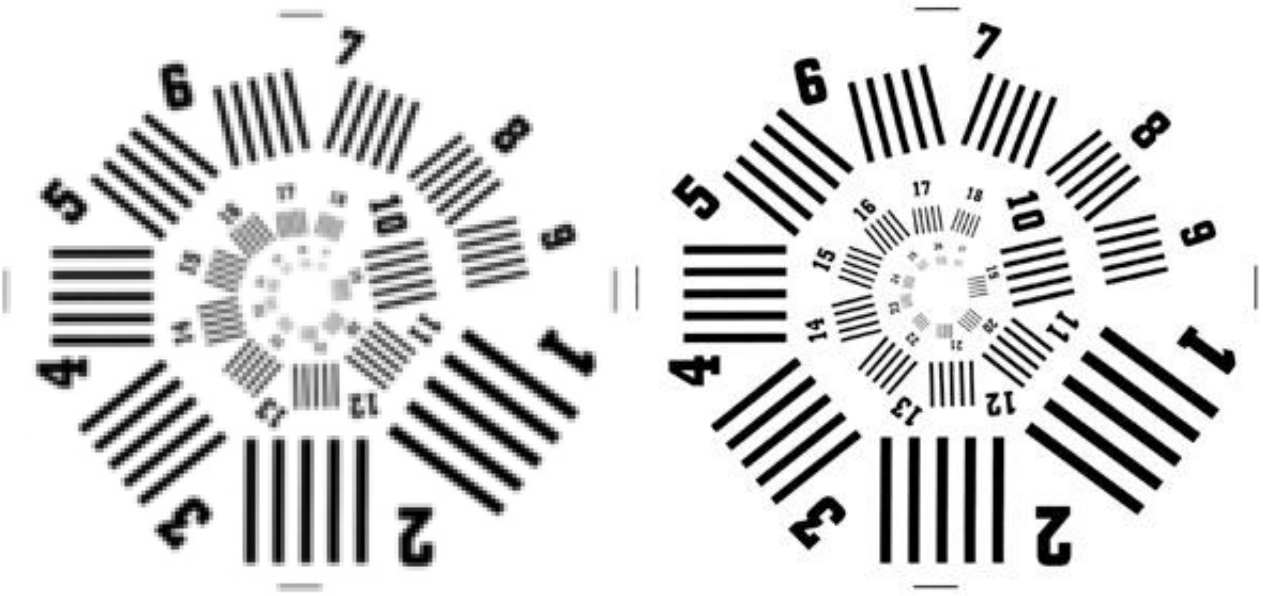
Приймемо, що роздільна здатність систем аерофотозйомки без субпіксельної обробки рівна 1,897 м., швидкість польоту приймемо 108 км/год – 0,03 км/с. В результаті отримаємо, що час сканування однієї лінії сцени становить 63,234 мс., отже час сканування всієї сцени становить 582,765 с. А час виконання алгоритму субпіксельної обробки, як згадувалося вище, становить 225 секунд. При таких умовах ми можемо здійснити субпіксельну обробку, оскільки час виконання алгоритму є меншим за час сканування. Але потрібно прийняти до уваги, що компютер на якому проводилися дослідження має великі масо-габаритні характеристики. Але час виконання алгоритму є більш ніж у два рази меншим ніж час сканування, тому можна використати менш потужну компютерну систему, з меншим споживання енергії та кращими масо-габаритними характеристики Тобто така система може бути встановлена на борту системи аерофотозйомки.

З результатів моделювання можна зробити висновок, що процедуру субпіксельної обробки на борту КА, практично неможливо виконувати в реальному масштабі часу. Тому блок процесора субпіксельної обробки недоцільно розташовувати на борту системи дистанційного зондування Землі космічного базування. Цей блок повинен бути розміщений в системі наземної станції зв’язку. На борту системи ДЗЗ повинна бути апаратура тільки для оцифрування сигналів з двох ПЗЗ-лінійок, блок суміщення відліків, корекції

фотометричних похибок та високошвидкісна система прийому-передачі даних. Для систем повітряного базування можливе використання апаратури субпіксельної обробки, оскільки в результаті розрахунків зроблено висновок, що при таких умовах система субпіксельного формування зображення працюватиме в реальному масштабі часу. Дана властивість є важливою характеристикою і впливає на тактичні характеристики апарату.

В результаті роботи запропонованого методу, стає можливим підвищення роздільної здатності з 1,897 м. до 0,95 м. при хорошому стані атмосфери і погодних умовах.

Для прикладу приведемо результат роботи запропонованого методу, використовуючи сканування міри:



а) б)

Рисунок 4.14 – Результати роботи запропонованого алгоритму: а) низькороздільне зображення (наприклад сформоване однією CCD8091); б) сформоване зображення за допомогою алгоритму запропонованого в п.3.2

4.6. Рекомендації по технічній реалізації програмно-апаратних засобів для субпіксельної обробки зображень ДЗЗ

Як згадувалося раніше, оскільки для КА неможливо здійснювати в реальному масштабі часу, процедуру усунення впливів на зображення, то

пропонується на борту ДЗЗ розмістити тільки бортову апаратури обробки сигналів фотоприймачів. Процесорний модуль субпіксельної обробки зображень повинен бути в складі наземної станції зв'язку.

Процесорний модуль субпіксельної обробки зображень повинен виконувати наступні основні функції:

- прийом та тимчасове збереження в високошвидкісній оперативній пам'яті двох зображень одержаних по високошвидкісному радіоканалу (до 2 Гбіт/с);
- частотну фільтрація;
- адаптивну фільтрація шумів;
- реалізацію прямого та зворотного перетворення Фур'є;
- реалізацію високоефективних алгоритмів виконання операцій над матрицями великого розміру;
- стиснення та збереження вихідного зображення в внутрішній пам'яті модуля;
- збереження зображень отриманих по радіоканалу та зображень отриманих після обробки на зовнішній носій великого об'єму пам'яті, для створення баз даних;
- можливість передачі вихідних даних на інші пристрої;
- виконання алгоритму відновлення зображення на основі інверсної фільтрації з регуляризацією Тихонова;
- швидкість запису та зчитування оперативної пам'яті повинна забезпечувати запис даних в реальному масштабі часу;
- великий об'єм оперативної пам'яті для забезпечення роботи алгоритмів обчислення матриць великого розміру;
- обчислювальна продуктивність центрального процесора повинна забезпечувати обробку даних як можна ближче до реального масштабу часу;

- забезпечення синхронізації, через радіоканал з аналого-цифровим процесором який знаходиться на борту пристрою дистанційного зондування Землі.

Оскільки процесор субпіксельної обробки знаходиться в складі наземної станції, то вимоги до масо-габаритних характеристик спрощуються. Отже, для його реалізації на апаратному рівні можна використати одноплатний комп'ютер, який може забезпечити виконання вище згаданих вимог до апаратної частини. Виконання програмних функцій забезпечується використанням програмного продукту для реалізації потрібних для обробки функцій.

Для забезпечення високої швидкості (до 2 Гбіт/с), прийому-передачі даних, при лінійках з кількістю 9216 пікселів, потрібен інтерфейс USB 3.0. Високі вимоги ставляться до швидкості шини даних, швидкості запису-читання оперативної пам'яті, та стандарту інтерфейсу жорсткого диску.

Найбільші вимоги ставляться до обчислювальної продуктивності центрального процесора.

В якості платформи для побудови блоку субпіксельної обробки можна вибрати одноплатний комп'ютер NANO-QM770, компанії «IEI Technology Corporation», з підтримкою мобільних процесорів Socket G2 Intel® 22нм. Завдяки переходу на 22нм техпроцес виготовлення процесорів вдалося підвищити швидкодію та зменшити енергоспоживання. Цей варіант виконання процесора дає можливість зробити компактну систему з низьким споживанням енергії. Завдяки використанню в комп'ютері чіпсету Intel® QM77 вдається забезпечити швидкий обмін даними, підтримку стандарту USB 3.0, підтримка стандарту SATAIII, що дозволяє обмінюватися інформацією з вінчестером на швидкості до 6 Гбіт/с. Підтримується до 8 ГБ швидкодіючої оперативної пам'яті DDR3 1066/1333/1600 МГц, DVI, 18/24-біт LVDS, HDMI. Gigabit Ethernet на Intel® 82583V.

Пристрій субпіксельної обробки зображень побудований на даній платформі повинен працювати відповідно до алгоритмів та вимог, забезпечувати математичні операції по роботі з матрицями, реалізацію прямого та зворотного перетворення Фур'є і т.д.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено алгоритм субпіксельної обробки зображень для стадії формування на КА, алгоритм субпіксельної обробки зображень на наземній станції. Описано стадії визначення оптимального коефіцієнта резуляризації.

2. Запропоновано технологію підвищення якості та роздільної здатності багатоспектральних зображень із застосуванням субпіксельної обробки у відомих алгоритмах Брові та IHS, що дало можливість підвищити якість багатоспектрального зображення при збільшенні його за розміром у 8 разів. Запропоновано програмний продукт виконання даного алгоритму.

3. З результатів моделювання можна зробити висновок, що процедуру субпіксельної обробки на борту КА, практично неможливо виконувати в реальному масштабі часу. Тому блок процесора субпіксельної обробки недоцільно розташовувати на борту системи дистанційного зондування Землі космічного базування. Цей блок повинен бути розміщений в системі наземної станції зв'язку. На борту системи ДЗЗ повинна бути апаратура тільки для оцифрування сигналів з двох ПЗЗ-лінійок, блок суміщення відліків, корекції фотометричних похибок та високошвидкісна система прийому-передачі даних.

4. Для систем повітряного базування можливе використання апаратури субпіксельної обробки, оскільки в результаті розрахунків зроблено висновок, що при таких умовах система буде працювати в реальному масштабі часу при швидкості руху до 216 км/год.

5. В результаті роботи запропонованого методу, стає можливим підвищення роздільної здатності з 1,897 м., розрахованої в 1 розділі для

конкретного випадку, до 0,95 м. при хорошому стані атмосфери і погодних умовах.

6. Розроблено рекомендації технічної реалізації процесорного модуля для субпіксельної обробки сигналів, що дає можливість забезпечити математичні операції по комбінуванню зображень, згортці зображень, відновленні зображень видимого каналу, усуненні впливу апертури пікселя, фільтрації шумів, розрахунку оптимального значення регуляризації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання підвищення роздільної здатності сканерів видимого діапазону систем дистанційного зондування Землі, які встановлюються на космічних апаратах. Для цього удосконалено матричну модель процесу субпіксельного формування зображень, вперше оцінено вплив форми пікселів на якість зображень, та параметрів руху КА, розроблено методологію підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, розроблено практичні рекомендації застосування структури сканера та алгоритмів обробки зображень. Всі положення, подані в роботі, обґрунтовані на основі відомих положень оптики, теорії цифрової обробки сигналів, підтверджено числовими експериментами та комп’ютерним моделюванням. При розв’язанні поставленого завдання отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано сучасні методи та засоби підвищення якості та роздільної здатності сучасних сканерів видимого діапазону систем ДЗЗ. Обґрунтовано, що забезпечення заданої якості формування зображень з високою роздільною здатністю та зменшення розмірів і ваги сенсора можливі при застосуванні методу субпіксельної обробки вхідних даних, одержаних з двох ПЗЗ-лінійок, зміщених одна відносно іншої на 0,5 пікселя. Досліджено переваги та обмеження існуючих методів субпіксельної обробки зображень.

2. Вперше встановлено зв'язок між якістю формування зображень та потенційною роздільною здатністю сканера і властивістю низькочастотного фільтра, викликаного формою апертури пікселя. Показано, що похибка формування зображення при запропонованих апертурах пікселів (круглій або з усіченими краями) є на 4-7% меншою, порівняно з використанням прямокутної форми пікселя, яка застосовується у діючих сканерах.

3. Вперше проведено оцінювання впливу нестабільності положення осі КА під час експозиції, обертання Землі, нестабільності висоти орбіти КА,

стабілізації КА та інших на модуляційну передавальну функцію сканера, що визначає допустиме число стадій накопичення, тобто максимально-допустиму кількість рядів накопичення ПЗЗ-лінійки, яка в районі екватора не повинна перевищувати 6 рядків, а у приполярній зоні не більше 31 з достатнім відношенням сигнал/шум при висоті орбіти H = 490 км.

4. Удосконалено матричну модель процесу субпіксельного формування зображень, що на відміну від відомого методу формування матриці результуючого зображення шляхом арифметичних операцій над елементами 4 матриць низькороздільних зображень, пропонується у вигляді оберненої згортки вхідного сигналу з апертурною функцією $h(\xi,\eta)$, що дозволяє зменшити кількість математичних операцій, а також відповідне навантаження на процесорний модуль КА та підвищити швидкодію в середньому в 2,2 рази.

5. Вперше запропоновано метод та алгоритм відновлення зображень з субпіксельною обробкою, який, на відміну від відомих, базується на оберненій згортці вхідного сигналу з врахуванням модуляційної передавальної функції $M_{\Sigma}(v_x,v_y)$, яка дозволяє зменшити вплив дестабілізуючих факторів, чим підвищується якість відновлення зображень та роздільна здатність сканера (в 2 рази).

6. Удосконалено метод та алгоритм підвищення якості та роздільної здатності багатоспектральних зображень із застосуванням субпіксельної обробки у відомих методах Брові та IHS (перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість), що дало можливість підвищити роздільну здатність багатоспектрального зображення до 8 разів при збільшенні останнього за розміром у 8 разів.

7. Розроблено рекомендації щодо технічної реалізації процесорного модуля, що дає можливість забезпечити математичні операції по формуванню зображень з субпіксельною обробкою, згортці зображень, відновленню зображень видимого каналу, усуненню впливу апертури пікселя, фільтрації

шумів, вибору оптимального значення коефіцієнта регуляризації при відновленні зображень видимого діапазону хвиль.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаков В.С. Слияние мультиспектральных изображений в задаче обработки спутниковых снимков / К.К. Титаренко, В.С. Бабаков // Четверта міжнародна науково-технічна конференція “Моделювання та комп’ютерна графіка - 2011”, Донецьк, ДонНТУ, 5-8 жовтня 2011 р. – С. 25-29.

2. Блажевич С. Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки / С. Блажевич, В. Винтаев, Н. Ушакова, Е. Селютина // М.: Механика, управление и информатика. – 2012. – С. 127–136.

3. Блажевич С.В. Повышения разрешения цифровых изображений с использованием субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, Е.С. Селютина // Научный аспект, № 1, Самара, Россия, 2013. – С. 204.

4. Блажевич С.В. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Н.Н. Ушакова, В.В. Шашков // Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция. – М.: Москва, ИКИ РАН, 2009. – С. 18.

5. Бурачек В. Г. Эффективность применения субпиксельных технологий синтеза изображений объектов для крупномасштабной аэрокосмической схемки / В.Г. Бурачек, В. И. Зацерковный, В. Ю. Беленок. Черниговский научный электронный журнал ЧГИЭУ. Серия 2, Техника и природа: электронный сборник научных работ. – Чернигов : ЧГИЭУ, 2011. – №2(2). – С. 9–19.

6. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. / Х.В. Бурштинська, С.А. Станкевич. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010. – 288 с.

7. Василенко Г.И. Восстановление изображений / Г.И. Василенко, А.М. Тараторин – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

8. Васьков С. Т. Быстрая цифровая реконструкция сигналов и изображений по критерию минимума энергии / С. Т. Васьков, В.И. Ефимов, Л.Л. Резник // Автометрия, 2003. Т. 39, N4.-0. – С. 13–20.

9. Веселов Ю. Г. Выбор тест-объекта для оценки разрешающей способности цифровых оптико-элетронных систем мониторинга земной поверхности [Електронний ресурс] / Ю. Г. Веселов, А. А. Данилин, В.В. Тихонычев. Наука и образование, 2012. – Режим доступу: http://technomag.bmstu.ru/file/out/505246. – Заголовок з екрану.

10. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р.Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

11. Горелов В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения / В.А. Горелов, Е.Л. Лукашевич, В.А. Стрельцов // ГИС-Ассоциация. – 2003. – №2 – С. 44–45.

12. Горный В.И. Оценка эффективности алгоритмов синтезирования апертуры сканирующего радиометра / В.И.Горный, М.И.Кислицкий, И.Ш.Латыпов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН. – 2010 г.– Том 7. – №2. – С. 14–25.

13. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг. – М.:Мир, 1988 – 415 с.

14. Душепа В. А. Сравнительный анализ субпиксельных алгоритмов при совмещении изображений / В. А. Душепа, М. Л. Усс // Радіоелектрон. і комп'ют. системи . – 2011. – № 4. – С. 41–51.

15. Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

16. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. – М.: «ДМК Пресс», 2010. – 976 с.

17. Злобин В.К. Обработка аэрокосмических зображений / В.К. Злобин, В.В. Еремеев. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288 с.

18. Зубко В.П. Огляд стану та тенденцій розвитку дистанційного зондування Землі / В.П. Зубко, П.Я. Іськов, І.Я. Подолюх, Я.І. Стефанишин // Космічна наука і технологія. – 1998. – Том 4. – №5/6. – С.67–87.

19. Ильин А.А. Обеспечение ориентации малого спутника, стабилизируемого собственным вращением / А.А. Ильин, М.Ю. Овчинников, В.И. Пеньков. – М.: Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. – 2004. – N 83. – С.193–194.

20. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.

21. Коберниченко В.Г. Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения / В.Г. Коберниченко, В.А. Тренихин // Успехи современной радиоэлектроники, № 4, Москва. – 2007. – С. 22–31.

22. Космические аппараты с оптико-электронными системами ДЗЗ. // Геоматика. – 2009. – №1. – С. 84–92.

23. Лаврова Н.П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование: Учебник для вузов / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко. – М.: Недра, 1981. – 296 с.

24. Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир [Електронний ресурс] / Л. Лазовский // Режим доступу: http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf . – Назва з екрану.

25. Маркелов К. С. Модель повышения информативности цифровых изображений на базе метода суперразрешения / К. С. Маркелов // Инженерный вестник, 03 марта 2013. – С. 525–542.

26. Миллер Б.М. Компенсация сдвига изображения при съемке с использованием ПЗС в режиме задержки и интегрирования / Б.М. Миллер,

Е.Я. Рубинович // Информационные процессы. – 2007. – Том 7. – №1. – С. 45–54.

27. Мимріков Д.О. Інформаційне комплексування даних парціальних каналів локації / Д.О. Мимріков, С.Є. Фабіровський // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікації РТ-2013: IX міжн. молодж. наук.-практ. конф., 22–26 квітня 2013 г.: тези доп. – Севастополь, 2013. – С. 77.

28. Монич Ю.И. Оценки качества для анализа цифрових изображений / Ю.И. Монич, В.В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – №4. – С. 376–386.

29. Обзор космических съемочных систем высокого разрешения [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://vinek.narod.ru/satellites.htm – Заголовок з екрану.

30. Основные технические характеристики объективов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.altcam.ru/techob.php – Заголовок з екрану.

31. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы / А.В. Павлов. – М., Энергия, 1974. – 360 с.

32. Пат. 2367019 Российская Федерация, МПК H 04 B 1/38, H 04 J 13/00. Способ интерполяции цифрового изображения / Бурсук В.Н.; заявитель патентообладатель Корпорация "САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд." (KR). - № 2007105236/09; заявл. 13.02.2007; опубл. 20.08.2008.

33. Пелешко Д.Д. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу / Д.Д. Пелешко, О.М. Маковейчук, А.М. Ковальчук, А.В. Клювак // Вісник НУ«ЛП»: Комп’ютерні науки та інформаційні технології, Львів. – 2013. – № 751. – С. 320– 333.

34. Передаточные характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://aco.ifmo.ru/el_books/introduction_into_specialization/glava-3/glava-3-3.html. – Заголовок з екрану.

35. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры / А.К. Поляков. - М.: Изд-во "СОЛОН-Пресс", 2003. – 320 с.

36. Поречный В. Использование САПР «MAX+plus II» для разработки цифровых устройств на ПЛИС фирмы «Альтера» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.epos.ua/view.php/pubs_3?subaction=showfull&id=983311200&archive=&start_from=&ucat=3&

37. Прудиус И.Н. Повышение эффективности выявления объектов путем комплексированния данных радиомониторинга / И.Н. Прудиус, Л.В. Лазько, Д.А. Мымриков, С.Є. Фабировский // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 23-я межд. Крымская конф., 8–14 сент. 2013 г.: материалы конф. – Севастополь, 2013. – С. 1226–1227.

38. Прудиус І.Н. Багаторівневе комплексування графічної інформації в системах дистанційного зондування / І.Н. Прудиус, Л.В. Лазько, С.О. Семенов // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів. – 2007. – № 618. – С. 3–11.

39. Резник Л.Л. Быстрые алгоритмы реконструкции изображений на основе субпиксельного сканирования / Л.Л. Резник, Л.Л. Соловьев // Материалы международной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» – Новосибирск: изд-во НГУ, 2004. – С. 7.

40. Рис У. Основы дистанционного зондирования / У. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.

41. Рябова Н.В. Малые искусственные спутники с оптико-электронной аппаратурой в программах дистанционного зондирования Земли / Н.В. Рябова, Д.Н. Еськов. – М.: Оптический журнал. – 1996. – №1. – С. 4–19.

42. Секен К. Приборы с переносом заряда: [пер. с англ.] / К. Секен, М. Томпсет.– М.: Мир, 1978. – 327 с.

43. Системы управления космических аппаратов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.hartron-arkos.kharkov.ua/sutkm.php. – Заголовок з екрану.

44. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М: Издательск.дом «Вильямс». – 2003. – 1104 с.

45. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

46. Тягур В.М. Лінійна роздільна здатність на місцевості космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування / В.М. Тягур, М.І. Лихоліт, В.Г. Колобродов // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2007. – №4 – С. 95–100.

47. Фабіровський С.Є. Використання субпіксельної обробки зображень для підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень / С.Є.Фабіровський, І.Н. Прудиус // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2015. – № 818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 62–68.

48. Фабіровський С.Є. Субпіксельна обробка зображень в системах моніторингу видимого діапазону хвиль / С.Є.Фабіровський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2014. – № 796: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 49–53.

49. Фабіровський С.Є. Субпіксельна обробка зображень як шлях підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень / С.Є. Фабіровський // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 20-й міжн. молодіж. форум, 19–21 квіт. 2016 р.: тези доп., том 3 – Х., 2016. – С. 66–67.

50. Фабіровський С.Є. Формування зображень з підвищеною роздільною здатністю при субпіксельній обробці / С.Є. Фабіровський, А.П. Гривачевський // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: 19-й міжн. молодіж. форум, 20–22 квіт. 2015 р.: тези доп., том 3 – Х., 2015. – С. 104–105.

51. Шипулин С. ПЛИС элементная база систем управления и обработки сигналов XXI века / С. Шипулин, Д. Губанов, В. Стешенко, В. Храпов // Электронные компоненты. – 2001. – №1. – С. 6–10.

52. Akgun T. Super-resolution reconstruction of hyperspectral images / T. Akgun, Y. Altunbasak, R.M. Mersereau // IEEE Transactions on Image Processing, 2005, P.1860–1875.

53. Andrews H. C., Digital Image Restoration: A Survey / H.C. Andrews // IEEE Computer, 7, 5. – 1974. – P. 36-45.

54. Andrews H.C. Digital image restoration / H.C. Andrews, B.R. Hunt. – New Jersey: Prentice-Hall, 1977. – 238 p.

55. Barbe D. F. Time Delay and integration Image Sensors / D. F. Barbe, P.G. Jespers, F. van de Wiele, M. H. White // Solid State Imaging, Noordhoff International Publishing, Leyden, The Netherlands, 1975, P. 659.

56. Cartosat-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://events.eoportal.org/pres_CartoSat1.html – Заголовок з екрану.

57. Cawley S. TopSat: low cost high resolution imagery from space [Електронний ресурс] / S. Cawley // Режим доступу: http://directory.eoportal.org/pres_TopSat – Заголовок з екрану.

58. CCD5061 6K x 128 Element TDI — Time, Delay and Integration, Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.fairchildimaging.com – Заголовок з екрану.

59. CCD8091 9K x 128 Element TDI — Time, Delay and Integration, Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.fairchildimaging.com – Заголовок з екрану.

60. Chena C.M. Fusion of hyperspectral and radar data using the HIS transformation to enhance urban surface features / C.M. Chena, G.F. Hepnerb, R.R. Forsterb // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. – 2003. – V. 58. – P. 19–30.

61. Fabirovskyy Sergiy. Influence of a Pixel Aperture by Subpixel Imaging in Remote Sensing of the Earth / Sergiy Fabirovskyy, Leonid Lazko, Ivan Prudyus // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer

Science TCSET'2014: intern. conf., February 25 – March 1, 2014: proceed. of the conf. - Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 814–816.

62. Fabirovskyy Sergiy. Matrix model of the subpixel imaging process by optical scanner / Sergiy Fabirovskyy, Ivan Prudyus, Viktor Tkachenko, Leonid Lazko // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science TCSET'2016: intern. conf., February 23 – 26, 2016: proceed. of the conf. - Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P. 246–249.

63. Fabirovskyy Sergiy. Simulation of subpixel image processing in optical monitoring systems / Sergiy Fabirovskyy, Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Leonid Lazko // MIKON 2014: intern. conf, June 16-18. – P.74–76.

64. Fairchild Imaging CCD 10121 12K x 128 Element, Time Delay Integration Sensor, Data Sheet 2012 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.fairchildimaging.com – Заголовок з екрану.

65. Farsiu S. Fast and Robust Multi-frame Super-resolution/ S. Farsiu, D. Robinson, M. Elad, and P. Milanfar // IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 10, October 2004. – P. 1327–1344.

66. Fairchald Imaging [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.eureca.de – Заголовок з екрану.

67. Gao S. Lossless inter-array predictive coding for subpixel-shifted satellite images based on texture analysis / S. Gao, X.J. Zhang, W.D. Sun // Proc. 12th Int. Conf. on Geoinformatics − Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic University of Gävle, Sweden, 2004. – P. 275–276.

68. Glasner Daniel. Super-Resolution from a Single Image / Daniel Glasner, Shai Bagon, Michal Irani // Computer Vision, IEEE 12th International Conference 2009. – P. 349–356.

69. Gonzalez R.C. Digital image processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – New Jersey: Prentice-Hall, 2002. – 1072 p.

70. Inglada J. Analysis of artifacts in subpixel remote sensing image registration / J. Inglada, V. Muron, D. Pichard, T. Feuvrier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(1). – 2007. – P.254–264.

71. Irani M. Improving Resolution by Image Registration / M. Irani and S. Peleg// CVGIP: Graphical Models and Image Proc., Vol. 53, 1991. – P. 231–239.

72. Jacobsen K. High Resolution Imaging Satellite Systems / K. Jacobsen // Photogram-metrie Fernerkundung Geoinformation. – 2005. – P.487–496.

73. Jacobsen K. Very high resolution satellite images — competition to aerial images / K. Jacobsen // Proc. Map World Forum, Hyderabad, India – 2010. – P. 63–70.

74. Kaufmann H. The German MOMS-02 Sensor Technical Design and results of the STS-55/ H. Kaufmann, M. Berger // Proc. of SPIE. – 1995. – Vol. 2646 – P.112–123.

75. Kim K. I. Example-Based Learning for Single-Image Super-Resolution and jpeg Artifact Removal / K. I. Kim and Y. Kwon // Max-Planck-Institute for Biological Cybernetics, Tübingen, Germany, 2008. – P. 1–28.

76. Kondratov Peter. Subpixel processing of digital images obtained with CCD matrix/ Peter Kondratov, Albert Oganesyan, Ivan Prudyus, Viktor Tkachenko, Sergiy Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015). – 2015. – P. 74–77.

77. Kondratov Petro. Single Frame Handling of Pyroelectric Signal of the Thermal Imaging Camera / Petro Kondratov, Victor Tkachenko, Sergiy Fabirovskyy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science TCSET'2014: intern. conf., February 25 – March 1, 2014: proceed. of the conf. - Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 817–819.

78. Lansing J. Thematic mapper design description and perfomance preduction / J. Lansing, T. Wiss, E. Harney // Proc. of SPIE. – 1979. – Vol. 0183 – P.224-234.

79. Latry C. Staggered Arrays for high resolution earth observing systems / C. Latry, J-M. Delvit // Earth Observing Systems XIV, proceedings of the SPIE, Jul. 2009, Volume 7452.

80. Latry C. Super resolution: quincunx sampling and fusion processing / C. Latry, B. Rouge // In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03, volume 1. – P. 315 – 317.

81. Lillo-Saavedra M. Multispectral images fusion by a joint multidirectional and multiresolution representation / M. Lillo-Saavedra, C. Gonzalo // Int. J. Remote Sens., 2007, vol. 28, P. 4065–4079.

82. Nagura R. High resolution optical imaging system / R. Nagura // Proc. Of SPIE. – 1990. – Vol. 1300. – P.179–189.

83. Nguyen M. Q. Superresolution mapping using a hopfield neural network with fused images / M. Q. Nguyen, P. M. Atkinson, H. G. Lewis // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, March 2006, vol. 44, no. 3, P. 736–749.

84. Pateraki Maria. Analysis of a DSM generation algorithm for the ADS40 airborne pushbroom sensor / Maria Pateraki and Emmanuel Baltsavia // Optical 3D Measurement Techniques, Switzerland. – 2003. – P. 83–91.

85. Peng Lv. Study CCD Image Motion for Remote Sensing Detection / Lv Peng, Tang Yuanhe // 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 2007, Proc. of SPIE Vol. 6279 62795S-1.

86. Price J.C. Combining multispectral data of different spatial resolution / J.C. Price // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, vol. 37, No. 3, P. 1199-1203.

87. Prudyus I. Spectral based approach to subpixel image formation / I. Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy // Computational Problems of Electrical Engineering / Lviv Politechnic National University; editor-in-chief Yuriy Bobalo. - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. - Volume 3, number 1. – P. 87–92.

88. Prudyus I. Sub-pixel Based Forming of High-Resolution Images/ Ivan Prudyus, Viktor Tkachenko, Leonid Lazko, Sergiy Fabirovskyy // Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – № 7. – P. 45–48.

89. Prudyus Ivan. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data / Ivan Prudyus, V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy// IX Krajowa Koferencja “Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów” (Diag’2015). Ustroń. Polska. 22÷25 września 2015r. Referaty. S. 79.

90. Prudyus Ivan. Factors affecting the quality of formation and resolution of images in remote sensing systems / Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Peter Kondratov, Sergiy Fabirovskyy, Leonid Lazko, Andriy Hryvachevskyi // Computational Problems of Electrical Engineering : науково-технічний журнал / Lviv Politechnic National University; - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – Volume 5, number 1. – P. 41–46.

91. Prudyus Ivan. Spectral Based Approach of Subpixel Image Formation / Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Peter Kondratov, Leonid Lazko, Serhiy Fabirovskyy // Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2013) : XIV International Workshop, September 4 – 6, 2013 p. : proceedings of Workshop. – Křivoklátu, Czech Republic. – 2013. – P. YII-9.

92. Prudyus Ivan. Sub-pixel Based Forming of High-resolution Images / Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Leonid Lazko, Sergiy Fabirovskyy, Andriy Gryvachevskyy// Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2014) : XV International Workshop, 9th – 12th September 2014. : proceedings of Workshop. – Terchová, Slovak Republic. – 2014. – P. 24.

93. QuickBird imaging spacecraft [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.digitalglobe.com – Заголовок з екрану.

94. Schlienger R. Increased image quality resulting from new technologies in aerial cameras / R. Schlienger // IAPRS Vol. XXXI, Part B1, Commission I, 1996. – P. 176-181.

95. SPOT 5 Supermode. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://spot5.cnes.fr/gb/systeme/3110.htm. – Заголовок з екрану.

96. Stavitsky D. Next generation commercial space-born systems / D. Stavitsky, A. Blasberger // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4540. – P. 529–533.

97. Stoney W. ASPRS guide to land imaging satellites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.asprs.org/a/news/satellites/ASPRS_DATABASE _021208.pdf – Заголовок з екрану.

98. TDI – CCD image sensors S10200-02, S10201-04, S10202-08, S10202-16, Data Sheet, 2009 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.hamamatsu.com – Заголовок з екрану.

99. Very High resolute Linear CCD Image Sensor (12000 Pixels) TH7834C [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.atmel.com – Заголовок з екрану.

100. Wang Hu. The progress of sub-pixel imaging methods / Wang Hu, Wen Desheng // Proceedings of the SPIE, Volume 9142, id. 91420K 5 pp. 2014.

101. Yao Y. L. Time Delay and Integration Imagers and Their Applications to Image Acquisition Cameras / Y. L. Yao, E. S. Schlig, and Francis P. Giordano // Proceedings of the IEEE CompEuro Conference, 1989. – P. 45–48.

102. Z Lin. Fundamental limits of Reconstruction-Based super resolution algorithms under local translation/ Lin Z, Shum H. // IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 2004. – P. 83–97.

103. Zhang Ningyu. Effects of Brovey Transform and Wavelet Transform on the Information Capacity of SPOT-5 Imagery / Ningyu Zhang, Quanyuan Wub // International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007 Proc. of SPIE Vol. 6623 66230W-1, June 2007, – P. 2690-2695.

104. Zurbuchen T. H. Low-Cost Earth Imaging System / T. H. Zurbuchen // Aerospace Conference 2007, IEEE Proceedings. – 2007. – P. 1717.

ДОДАТОК А.

БІБЛІОТЕКА ПІДПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З СУБПІКСЕЛЬНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ В ПАКЕТІ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ MATLAB

```
clc; clear all; close all; % очищення від попередніх розрахунків;
Im = double(imread('img.bmp'));
I=Im(:,:,1);
figure(1); imagesc(f); colormap(gray); colorbar; title('Оригінальне зображення');
I_F=fftn(I); % Спектр оригінального зображення
figure; imagesc(log(1+abs(fftshift(I_F)))); colormap(gray); colorbar; title('Спектр
оригінального зображення');

resize_factor=33; % Розмір субпікселя

% СИНТЕЗ АПЕРТУР ПІКСЕЛІВ
% Квадратна
PSF1=zeros(size(I)); % формування нульової матриці з потрібним розміром
PSF1(1:floor(resize_factor/2+1),1:floor(resize_factor/2+1))=1; % 1 частина пікселя
PSF1((end-floor(resize_factor/2)+1):end,(end-floor(resize_factor/2)+1):end)=1; % 2
PSF1(1:floor(resize_factor/2+1),(end-floor(resize_factor/2)+1):end)=1; % 3
PSF1((end-floor(resize_factor/2)+1):end,1:floor(resize_factor/2)+1)=1; % 4
figure; imagesc(PSF1);colormap(gray);

% Ромбоподібна
N=size(I);
r=25;
pixel=zeros(N);
pixel_2=zeros(size(pixel));
pixel_3=zeros(size(pixel));
pixel_4=zeros(size(pixel));
for k=1:N
    for l=1:N
        if (k+l)<=r
```

```
            pixel(k,l)=1;
        end;
    end
end

pixel_2(:,2:end)=fliplr(pixel(:,2:end));
pixel_3(2:end,:)=flipud(pixel_2(2:end,:));
pixel_4(2:end,:)=flipud(pixel(2:end,:));

PSF2=pixel+pixel_2+pixel_3+pixel_4;
figure; imagesc(PSF2);colormap(gray);

% Кругла апертура
N=size(I);
r=18;
pixelk=zeros(N);
pixelk_2=zeros(size(pixelk));
pixelk_3=zeros(size(pixelk));
pixelk_4=zeros(size(pixelk));
for k=1:N
    for l=1:N
        if (k^2+l^2)<=r^2
            pixelk(k,l)=1;
        end;
    end
end
pixelk_2(:,2:end)=fliplr(pixelk(:,2:end));
pixelk_3(2:end,:)=flipud(pixelk_2(2:end,:));
pixelk_4(2:end,:)=flipud(pixelk(2:end,:));
```

```
PSF3=pixelk+pixelk_2+pixelk_3+pixelk_4;
figure; imagesc(PSF3);colormap(gray);

% Апертура з усіченими кутами
N=size(I);
r=26;
pixelu=zeros(N);
pixelu_2=zeros(size(pixelu));
pixelu_3=zeros(size(pixelu));
pixelu_4=zeros(size(pixelu));

for k=1:N
   for l=1:N
      if (k+l)<=r
         pixelu(k,l)=1;
      end;
   end
end
pixelu_2(:,2:end)=fliplr(pixelu(:,2:end));
pixelu_3(2:end,:)=flipud(pixelu_2(2:end,:));
pixelu_4(2:end,:)=flipud(pixelu(2:end,:));
PSF4=pixelu+pixelu_2+pixelu_3+pixelu_4;
figure; imagesc(PSF4);colormap(gray);
PSF41=zeros(size(I)); % формування нульової матриці з потрібним розміром
PSF41(1:floor(resize_factor/2+1),1:floor(resize_factor/2+1))=1; % 1 частина
пікселя
PSF41((end-floor(resize_factor/2)+1):end,(end-floor(resize_factor/2)+1):end)=1; % 2
PSF41(1:floor(resize_factor/2+1),(end-floor(resize_factor/2)+1):end)=1; % 3
PSF41((end-floor(resize_factor/2)+1):end,1:floor(resize_factor/2)+1)=1; % 4
```

```
PSF4=PSF41.*PSF4;
figure; imagesc(PSF4);colormap(gray);

PSF1=PSF1/(sum(PSF1(:))); % нормалізація для суми пікселів рівній 1
PSF2=PSF2/(sum(PSF2(:))); % нормалізація для суми пікселів рівній 1
PSF3=PSF3/(sum(PSF3(:))); % нормалізація для суми пікселів рівній 1
PSF4=PSF4/(sum(PSF4(:))); % нормалізація для суми пікселів рівній 1
PSF1_F=fftn(PSF1); % розрахунок спектру апертури пікселя
figure; imagesc(fftshift((abs(PSF1_F)+eps))); title('Spektur pertyru'); colormap(gray);
colorbar; % візуалізація
PSF2_F=fftn(PSF2); % розрахунок спектру апертури пікселя
figure; imagesc(fftshift((abs(PSF2_F)+eps))); title('Spektur pertyru'); colormap(gray);
colorbar; % візуалізація
PSF3_F=fftn(PSF3); % розрахунок спектру апертури пікселя
figure; imagesc(fftshift((abs(PSF3_F)+eps))); title('Spektur pertyru'); colormap(gray);
colorbar; % візуалізація
PSF4_F=fftn(PSF4); % розрахунок спектру апертури пікселя
figure; imagesc(fftshift((abs(PSF4_F)+eps))); title('Spektur pertyru'); colormap(gray);
colorbar; % візуалізація

% Стабілізуюча функція
size_I=(size(I));
 [Fx,Fy]=meshgrid(0:(size_I(2)-1),0:(size_I(1)-1));
W=Fx.^2+Fy.^2;
figure; imagesc(W);
figure; mesh(W);
W(1:(end/2),((end/2+1):end))=fliplr(W(1:(end/2),1:(end/2)));
W(1:(end/2),((end/2+1):end))=fliplr(W(1:(end/2),1:(end/2)));
```

```
W(((end/2+1):end),:)=flipud(W(1:(end/2),:));

figure; imagesc(W);
figure; imagesc(angle(fftn(W)));
figure; mesh(angle(fftn(W)));

% МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ АПЕРТУРОЇ ФУНКЦІЇ ТА ШУМУ

% Синтез шуму

SNR_dB = [0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60];
for sdb = 1:13;
   Power_Image=10*log10(std(I(:))); % Потужність сигналу в дБ
    Noise_dB(sdb)=Power_Image-SNR_dB(sdb); % Потужність шуму в дБ
    Noise(sdb)=10^((Noise_dB(sdb))/10); % Потужність шуму в разах
    ns(:,:,sdb)=(Noise(sdb))*randn(size(b0)); % Синтезований адитивний шуму
    N_F(:,:,sdb)=fftn(ns(:,:,sdb));
end

% Спотворення

Inab(:,:,1)=real(ifftn(fftn(I).*PSF1_F)); % Зображення спотворене квадратною ап.
Inab(:,:,2)=real(ifftn(fftn(I).*PSF2_F)); % Зображення спотворене ромб. аперт.
Inab(:,:,3)=real(ifftn(fftn(I).*PSF3_F)); % Зображення спотворене круглою аперт.
Inab(:,:,4)=real(ifftn(fftn(I).*PSF4_F)); % Зображення спотворене ап. з усіч. кут.

% ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НИЗЬКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ
ЗСУНУТИХ НА СУБПІКСЕЛЬНУ ВІДДАЛЬ
%Формування 4 низкороздільних зображень
```

```
b0 = zeros(size_I(1)/2,size_I(2)/2);
b1 = zeros(size_I(1)/2,size_I(2)/2);
b2 = zeros(size_I(1)/2,size_I(2)/2);
b3 = zeros(size_I(1)/2,size_I(2)/2);

n=size_I(1)/2;
m=size_I(2)/2;

b0(1,1)=I(1,1)+I(1,2)+I(2,1)+I(2,2);
b1(1,1)=I(1,1)+I(1,2);
b2(1,1)=I(1,1);
b3(1,1)=I(1,1)+I(2,1);

for j = 2:n;
   b2(j,1)=I(2*j-2,1)+I(2*j-1,1);
   b1(j,1)=I(2*j-1,1)+I(2*j-2,1)+I(2*j-2,2)+I(2*j-1,2);
   b3(j,1)=I(2*j-1,1)+I(2*j,1);
   b0(j,1)=I(2*j-1,1)+I(2*j,1)+I(2*j-1,2)+I(2*j,2);
end

for j = 2:m;
   b2(1,j)=I(1,2*j-1)+I(1,2*j-2);
   b1(1,j)=I(1,2*j-1)+I(1,2*j);
   b3(1,j)=I(1,2*j-1)+I(1,2*j-2)+I(2,2*j-2)+I(2,2*j-1);
   b0(1,j)=I(1,2*j-1)+I(1,2*j)+I(2,2*j-1)+I(2,2*j);
end
```

```
for i = 2:n;
   for j = 2:m;
      b0(i,j)=I(2*i-1,2*j-1)+I(2*i-1,2*j)+I(2*i,2*j-1)+I(2*i,2*j);
      b1(i,j)=I(2*i-1,2*j-1)+I(2*i-1,2*j)+I(2*i-2,2*j-1)+I(2*i-2,2*j);
      b2(i,j)=I(2*i-1,2*j-1)+I(2*i-2,2*j-1)+I(2*i-1,2*j-2)+I(2*i-2,2*j-2);
      b3(i,j)=I(2*i-1,2*j-1)+I(2*i,2*j-1)+I(2*i-1,2*j-2)+I(2*i,2*j-2);
   end
end

% b0=b0/4;b1=b1/4;b2=b2/4;b3=b3/4;

% Вплив шуму
b0_F = fftn(b0)+N;
b0=abs(ifftn(b0_F));
b1_F = fftn(b1)+N;
b1=abs(ifftn(b1_F));
b2_F = fftn(b2)+N;
b2=abs(ifftn(b2_F));
b3_F = fftn(b3)+N;
b3=abs(ifftn(b3_F));

% figure; imagesc(b0); title('1 image');colormap(gray);colorbar;
% figure; imagesc(b1); title('2 image');colormap(gray);colorbar;
% figure; imagesc(b2); title('3 image');colormap(gray);colorbar;
% figure; imagesc(b3); title('4 image');colormap(gray);colorbar;

figure;
subplot(2,2,1), subimage(uint8(b0/4)); title('1 image');colormap(gray);
subplot(2,2,2), subimage(uint8(b1/4)); title('2 image');colormap(gray);
```

```
subplot(2,2,3), subimage(uint8(b2/4)); title('3 image');colormap(gray);
subplot(2,2,4), subimage(uint8(b3/4)); title('4 image');colormap(gray);

%Об’єднання зображень в одне
a= zeros(size_I(1)+1,size_I(2)+1);
for i = 1:m;
   for j = 1:n;
      a(2*j-1,2*i-1)=b2(j,i);
   end
end
for i = 1:m;
   for j = 1:n;
      a(2*j,2*i)=b0(j,i);
   end
end
for i = 1:m;
   for j = 1:n;
      a(2*j-1,2*i)=b1(j,i);
   end
end
for i = 1:m;
   for j = 1:n;
      a(2*j,2*i-1)=b3(j,i);
   end
end
a(1,size_I(2)+1)=I(1,size_I(2))/1;
a(size_I(1)+1,size_I(2)+1)=I(size_I(1),size_I(2))/1;
a(size_I(1)+1,1)=I(size_I(1),1)/1;
for j = 2:2*n;
```

```
    a(j,2*m+1)=I(j-1,2*m)/1+I(j,2*m)/1;
end
for i = 2:2*m;
    a(2*n+1,i)=I(2*n,i-1)/1+I(2*n,i)/1;
end
figure; imagesc(a); colormap(gray); title('Сформоване зображення');

%Знаходження оптимального коефіцієнта регуляризації та відновлення
diap2=[10^-9 10^-8 10^-7 10^-6 10^-5 10^-4 10^-3 10^-2 0.1 1 10 100 10^3 10^4
10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 10^10 10^11];
size_diap2=(size(diap2));
for kr2 = 1:size_diap2(2)
    Tichonov=real(ifftn(((conj(PSF1_F)./(
(abs(PSF1_F).^2)+((eps*diap2(kr2)).*(abs(W)).^2)).*xzc_F))));
    err_Tichonov(kr2)=(norm(im_org(:)-Tichonov(:)))/norm(im_org(:));
end
figure; plot(err_Tichonov);
nomdiap2 = find(err_Tichonov==min(err_Tichonov))

toch2=0;
for krok2 = 0.11:0.01:1
    toch2=toch2+1;
Tichonov=real(ifftn(((conj(PSF1_F)./((abs(PSF1_F).^2)+((eps*krok2*diap2(nomdia
p2)).*(abs(W)).^2)).*xzc_F))));
    err_reg2(toch2)=(norm(im_org(:)-Tichonov(:)))/norm(im_org(:));
end

nom2 = find(err_reg2==min(err_reg2))
```

```
error2k(pk)=err_reg2(nom2)
alphaopt2 = (0.1*nom2+0.1)*diap2(nomdiap2)
xzc2=real(ifftn(((conj(PSF1_F)./(
(abs(PSF1_F).^2)+((eps*alphaopt2).*(abs(W)).^2)).*xzc_F))));
xzc2 = xzc2(1:size_I(1),1:size_I(2));
figure; imagesc(xzc2); colormap(gray); title('Tichonov'); % Відновлене зображення
end

% Побудова графіка
x = 0:5:60;
xi = 0:2.5:60;
Squarei = interp1(x,error2k,xi,'spline');
Rombi = interp1(x,error2romb,xi,'spline');
Roundi = interp1(x,error2krug,xi,'spline');
Truncated_cornersi = interp1(x,error2usich,xi,'spline');

figure;
plot(xi,Squarei,'-s',xi,Rombi,'-d',xi,Roundi,'-o',xi,Truncated_cornersi,'-v');
xlabel ('SNR, dB');
ylabel ('NMSE, %');
legend('Square','Rhomboid','Round','Truncated corners');
grid on
```

ДОДАТОК Б.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукове підприємство
Спеціальне конструкторське бюро телевізійних систем
СКБ ТВС

Научное предприятие
Специальное конструкторское бюро телевизионных систем
СКБ ТВС

Україна,79026, м.Львів-26, вул. Володимира Великого, 4, 212
Tel/Fax: 032-244-91-96, 244-91-79, Email: Yelmanov@lviv.farlep.net

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
НКП " СКБ телевізійних систем "
С.О. Єлманов
"10" грудня 2015р

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри РЕПС Національного університету «Львівська політехніка» Фабіровського Сергія Євгеновича на тему «Підвищення роздільної здатності сенсорів видимого діапазону систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень», яка подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі:
голова комісії – Головний інженер Воронков С.О.;
член комісії – старший науковий співробітник Віваль І.П.

склала акт про те, що результати дисертаційної роботи С. Є. Фабіровського впровадженні в розробках НКП " СКБ телевізійних систем ".

В роботах, які виконуються у НКП "СКБ телевізійних систем", використані результати дисертаційної роботи , зокрема, розроблений стійкий до шумів алгоритм формування та обробки зображень системи ДЗЗ з субпіксельною роздільною здатністю, який враховує просторову структуру пікселя, що дозволило покращити роздільну здатність системи, в 1,4 разів, у порівнянні з відомими алгоритмами. Також отримав впровадження удосконалений алгоритм підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень шляхом використання методу субпіксельної обробки зображень з урахуванням просторової структури пікселя, що дало можливість підвищити роздільну здатність зображення спектрального каналу з низькою роздільною здатністю до 8 разів.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії
Головний інженер Воронков С.О.

Член комісії:
старший науковий співробітник Віваль І.П.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
проф. _____ Чухрай Н.І.
«23» 06 2016 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Фабіровського Сергія Євгеновича на тему «Підвищення роздільної здатності сенсорів видимого діапазону для систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук при виконанні НДР на кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Національного університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доцента Жук Л.В., завідувача кафедрою радіоелектронних пристроїв та систем д.т.н., проф. Шклярського В.І., завідувача відділом науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н, Лазько Г.В., заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М. склали даний акт про те, що при виконані держбюджетних науково-дослідних робіт «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер» (№ держреєстрації 0113U001355) та «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» (№ держреєстрації 0115U000435), в яких Фабіровський С.Є. був виконавцем, використано результати його досліджень, а саме:

- дослідження переваг та обмежень субпіксельної технології обробки зображень;
- оцінка впливу різного роду факторів на якість зображень, усунення впливу апертури пікселя систем ДЗЗ видимого діапазону;
- рекомендації по вибору форми пікселя давача зображення;
- метод підвищення роздільної здатності систем моніторингу видимого діапазош з використанням субпіксельної обробки зображень;
- проведення експериментальної перевірки результатів субпіксельної обробки зображень на основі комп'ютерного моделювання;
- розроблена структура та архітектура бортового процесора корисного навантаження космічного апарату при субпіксельній обробці зображень сканером видимого діапазону системи ДЗЗ;
- рекомендації по технічній реалізації пристрою для субпіксельної обробки зображень;
- розроблений алгоритм підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень при субпіксельній обробці.

Голова комісії
Начальник НДЧ, доцент Л.В. Жук

Члени комісії:
Завідувач каф. РЕПС, проф. В.І. Шклярський

Зав. відділу НОСНД, к.т.н. Г.В. Лазько

Заст. начальника ПФВ Т.М. Чулой

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
доцент _____ О. Р. Давидчак
«23» 06 2016р.

АКТ

про впровадження у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» результатів дисертаційної роботи Фабіровського Сергія Євгеновича на тему «Підвищення роздільної здатності сенсорів видимого діапазону для систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень»

Даний акт складено про те, що у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі «Радіоелектронні пристрої та системи» в лекційних курсах, практичних та лабораторних роботах для студентів базового напрямку 0907– «Радіотехніка» використані наступні результати дисертаційної роботи:

1. Удосконалена модель субпіксельної обробки зображень оптичного діапазону для формування статичних зображень об'єктів і сцен (дисципліна «Системи та пристрої запису та відтворення звуку та зображень»).
2. Моделювання факторів які впливають на роздільну здатність зображень (дисципліна «Системи та пристрої запису та відтворення звуку та зображень»).
3. Вплив форми апертури пікселя на якість зображення. Вибір оптимальної форми апертури пікселя (дисципліна «Цифрові методи реалізації радіотехнічних систем).
4. Удосконалений метод та алгоритм підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень шляхом використання удосконаленого методу субпіксельної обробки зображень (дисципліна «Системи та пристрої запису та відтворення звуку та зображень»).

Використання вказаних результатів у навчальному процесі дало змогу студентам краще засвоїти особливості підвищення роздільної здатності в системах та пристроях формування зображень.

Директор інституту телекомунікацій,
радіоелектроніки та електронної техніки
д.т.н., проф. Прудиус І.Н.

Голова науково-методичної комісії ІТРЕ
д.ф. – м.н., проф. Убізський С.Б.

Зав. каф. РЕПС
д.т.н., проф. Шклярський В.І.