

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** заслужений працівник освіти України,  
доктор технічних наук, професор  
**Прудиус Іван Никифорович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
директор Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та  
електронної техніки.

**Офіційні опоненти:** лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Зубков Анатолій Миколайович,**  
Науковий центр Сухопутних військ Національної академії  
сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,  
провідний науковий співробітник;

кандидат технічних наук, доцент  
**Чесановський Іван Іванович,**  
Національна академія Державної прикордонної служби  
України імені Богдана Хмельницького, завідувач кафедри  
зв'язку, автоматизації та захисту інформації.

Захист відбудеться «17» листопада 2016 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «12» жовтня 2016 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент*



*І. В. Демидов*

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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. Аткинсон, 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. Нгуен (методи субпіксельної обробки); 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 вигоду, 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 створенні сканера для КА Січ-2М, у НКП "Спеціальне конструкторське бюро телевізійних систем" (м. Львів), у навчальному процесі при підготовці фахівців з напрямку «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: [8], [10], [13], [2], [13] – розроблення моделі для оцінки впливу апертури пікселя та її форми на якість відновлення зображення та інших факторів впливу на роздільну здатність

зображень; [7], [14], [9] – розробка та створення моделі субпіксельної обробки з урахуванням впливу апертури пікселя; [1], [11] – розробка методу та алгоритму субпіксельної обробки зображень; [12], [15], [16], [17] – розроблення моделі багатоспектрального комплексування; [5] – розроблення 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 [1] та Index Copernicus [2, 4, 5]; 12 є матеріалами і тезами на міжнародних науково-технічних конференціях, симпозіумах та форумах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], з них 4 [9, 10, 11, 16] 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також наведено відомості про особистий внесок здобувача і апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг роботи.

У першому розділі – «Аналіз сканерів систем ДЗЗ та методів забезпечення роздільної здатності елементів зображень» проведено аналіз методів підвищення роздільної здатності зображень. Розглянуто та вказано переваги та недоліки наявних методів субпіксельної обробки зображень.

Проведено оцінку роздільної здатності елементів зображення в сканерах ДЗЗ.

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. Проведено детальний аналіз структури та характеристик ФП ЧЗН типу CCD8091 з точки зору застосування цього ФП у сканері космічного базування на КА Січ-2М.

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.

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.

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.

Розглянуто принцип та методи субпіксельного формування зображень. Проаналізовано існуючі методи субпіксельної обробки зображень сканерів видимого діапазону.

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.

**У другому розділі** – «Оцінка факторів впливу на якість та роздільну здатність зображень, побудованих сканером систем ДЗЗ видимого діапазону» – встановлено основні фактори впливу на якість та роздільну здатність зображень, сформованих сканером системи ДЗЗ видимого діапазону. Сформульовано вимоги до параметрів стабілізації КА при проведенні ним зйомки на різних широтах земної поверхні.

Якість зображення, одержаного від сканера, прийнято визначати за допомогою модуляційної передавальної функції (МПФ) (модуль оптичної передавальної функції), тобто залежністю контрасту зображення періодичної міри від просторової частоти. Результуюча МПФ системи  $M_{\Sigma}(v_x, v_y)$  залежить від наступних факторів і дорівнює добутку їх функцій:

– у напрямку польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_x) = K_O M_{OB}(v_x) M_{ATM}(v_x) M_{ПЗЗ}(v_x) M_{\Phi}(v_x, a) M_{ЗС}(v_x, a') M_{\omega}(v_x) M_{\Delta H}(v_x), \quad (1)$$

– у напрямку, перпендикулярному польоту КА:

$$M_{\Sigma}(v_y) = K_O M_{OB}(v_y) M_{ATM}(v_y) M_{ПЗЗ}(v_y) M_{\Phi}(v_y, b) M_{\omega}(v_y) M_{\Delta H}(v_y) M_{ОБЗ}(v_y, \alpha), \quad (2)$$



де  $K_o$  – контраст тест-об'єкту на Землі;  $M_{ATM}(v_x, v_y)$  – МПФ атмосфери;  $M_{OB}(v_x, v_y)$  – МПФ об'єктиву сканера; де  $v_x, v_y$  – просторова частота оптичного випромінювання сигналу у напрямках  $x$  та  $y$  відповідно;  $M_{ПЗЗ}(v_x, v_y)$  – МПФ ПЗЗ-лінійки;  $M_{\phi}(v_x, a, v_y, b)$  – МПФ фазового положення смуги «тест-об'єкту»;  $a, b$  – розмір пікселя у напрямку довжини лінійки та в напрямку сканування відповідно;  $M_{зс}(v_x, a')$  – функція зниження МПФ у напрямку польоту КА за рахунок “зсуву” зображення;  $M_{\omega}(v_x, v_y)$  – функція зниження МПФ за рахунок нестабільності положення осі КА під час експозиції;  $M_{OBЗ}(v_y, \alpha)$  – функція зниження МПФ за рахунок обертання Землі під час експозиції;  $M_{\Delta H}(v_x)$  – функція зниження МПФ за рахунок нестабільності висоти орбіти КА під час експозиції.

За результатами моделювання впливу параметрів стабілізації КА на допустиме число стадій накопичення у сканері високої роздільної здатності (СВРЗ), 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. Для розрахунку максимально допустимої кількості рядків накопичення використовується залежність:

$$n \leq \frac{k \cdot a}{(b \cdot \psi_{\Sigma}) + (f'_0 \cdot \omega_{x0} \cdot t_H)} \cdot \rho \quad (3)$$

де  $k$  – допустима величина розмиття зображення ділянки підстилаючої поверхні Землі у напрямку польоту КА, виражена у долях проекції пікселя;  $\psi_{\Sigma}$  – максимальна можлива величина неперпендикулярності поздовжньої осі рядка ЧЗН-фотоприймача;  $f'_0$  – фокусна відстань об'єктива;  $\omega_{x0}$  – кутова швидкість коливань;  $t_H$  – час накопичення інформації на одному рядку ПЗЗ лінійки;  $\rho$  – кількість хвилин у одному радіані.

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. 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 серії СІЧ. 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. Максимально допустима кількість стадій накопичення в районі екватора не повинна перевищувати 6 рядків, а у приполярній зоні не більше 31, при висоті орбіти  $H = 490$  км.

Проаналізовано вплив відхилення номінальної (запланованої) висоти польоту КА над землею поверхнею на обмеження максимально-можливого числа стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі CCD8091. Знаходження максимально-можливого числа стадій накопичення при зміні номінальної висоти польоту для приполярних широт проводиться за формулою:

$$n_1 \leq \left\lceil \frac{k_1}{1 - \frac{H}{H + \Delta H} \cdot \left( \frac{R_3 + H}{R_3 + H + \Delta H} \right)^{3/2}} \right\rceil \quad (4)$$

де  $H$  – висота орбіти КА;  $\Delta H$  – зміна висоти орбіти;  $R_3$  – радіус Землі.

З метою недопущення розмиття зображення рекомендовано кожен раз перед початком зондування визначати точну висоту КА, уточнювати величину нахилу орбіти КА і визначати поточне значення аргументу широти, де проводиться зйомка. За цими даними необхідно врахувати 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.

Вперше встановлено зв'язок між якістю формування зображень та потенційною роздільною здатністю сканера і властивістю низькочастотного фільтра, викликаного формою апертури пікселя. Для цього створено лінійно-фільтрову модель процесу формування зображення, яка застосована на розгляді рівняння Фредгольма 1-го роду з ядром типу згортки в спектральній області. Це виглядає, як попереднє застосування низькочастотного просторового фільтра з подальшою просторовою дискретизацією вхідного зображення. Дана модель записується співвідношенням:

$$I(i, j) = S \cdot D \{ I(x, y) \oplus h(\xi, \eta, x, y) + N(x, y) \}, \quad (5)$$

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;  $x, y, \xi, \eta$  – лінійні координати;  $i, j$  – дискретні координати;  $\oplus$  – оператор згортки.

Запропонована модель враховує послаблення високих просторових частот вхідного зображення досліджуваного об'єкта апертурою пікселя, що призводить 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 викликаного 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. 1).

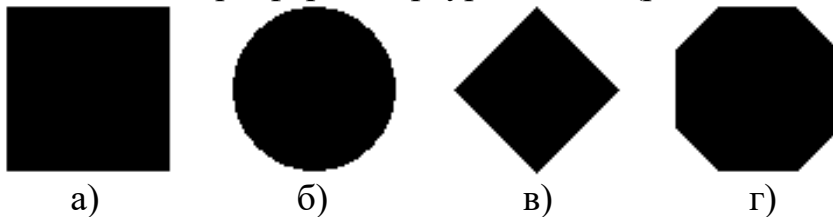


Рис. 1. Форма апертури пікселя: а) – квадратна, б) – кругла, в) – ромбоподібна, г) – з усіченими кутами

Для кожної із форм апертур проведено розрахунок контрастно-частотних характеристик, які приведені на рис. 2.

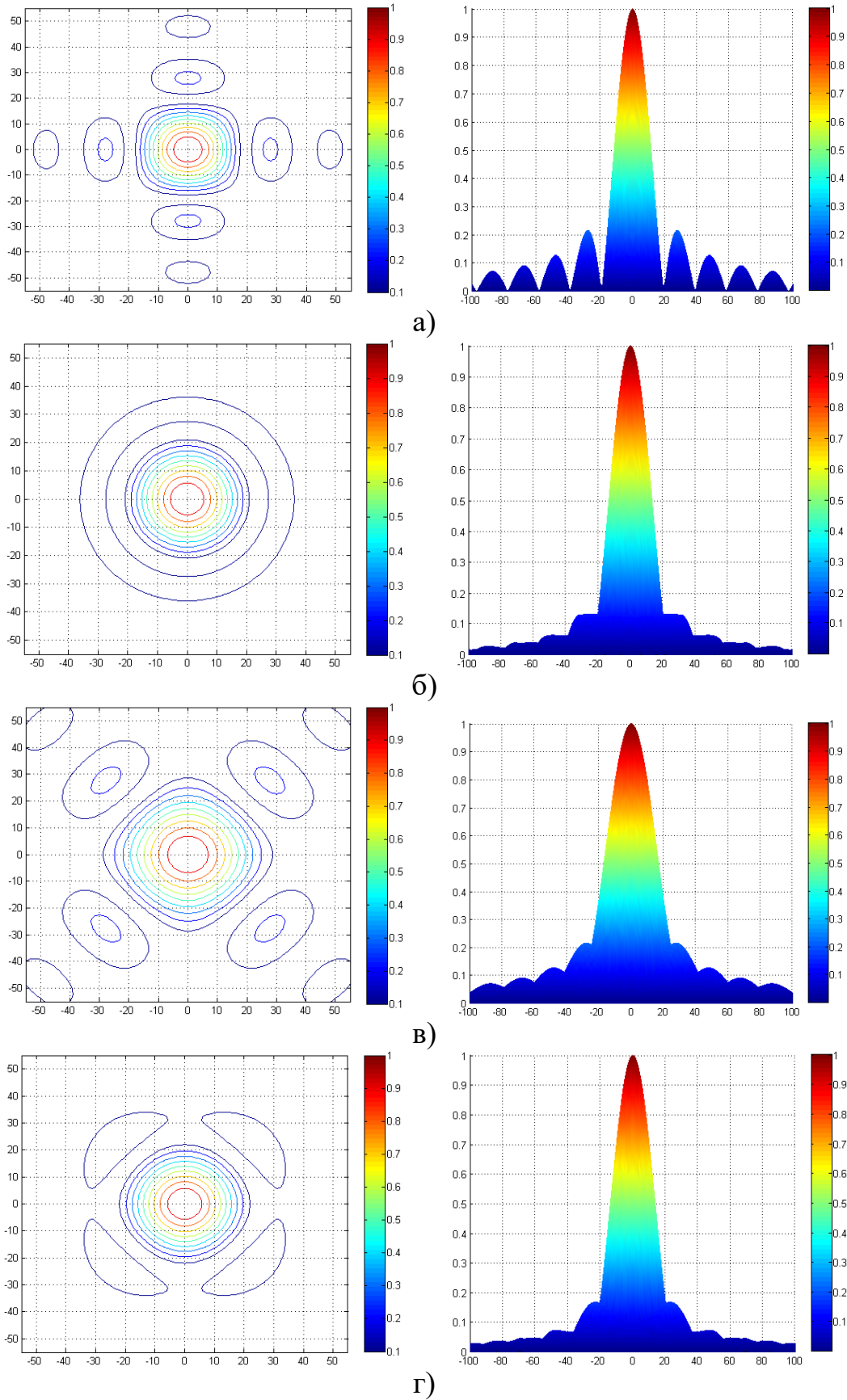


Рис. 2. Контрастно-частотні характеристики: а) квадратна форма пікселя; б) кругла форма; в) ромбоподібна форма; г) форма з усіченими кутами

Як видно, для розглянутих форм 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 напрямками, тим краща буде роздільна здатність. Ізотропія за напрямками характерна тільки для круглої форми апертури пікселя (рис. 2 б). Для інших форм апертур, особливо для квадратної (рис. 2 а) і ромбоподібної (рис. 2 в) є просторові кути, в яких відсутні просторові спектральні складові, тобто в межах цих кутів не представлені просторові спектральні складові досліджуваних об'єктів.

За результатами моделювання виявлено, що найменшу похибку забезпечує апертура пікселя круглої форми і наближеною до неї є апертура з усіченими краями. Значення похибки в обох напрямках сканування є однаковими. Найкращі результати отримані з круглою формою апертури пікселя. Але площа круглого пікселя є меншою від квадратної і, відповідно, меншою є чутливість. Тому пропонується використовувати форму пікселя з усіченими кутами.

У третьому розділі – «Модель процесу субпіксельного формування зображень сканером видимого діапазону» – запропоновано удосконалену матричну модель процесу субпіксельного формування зображень сканером.

На рис. 4. представлено схеми отримання чотирьох низькороздільних зображень

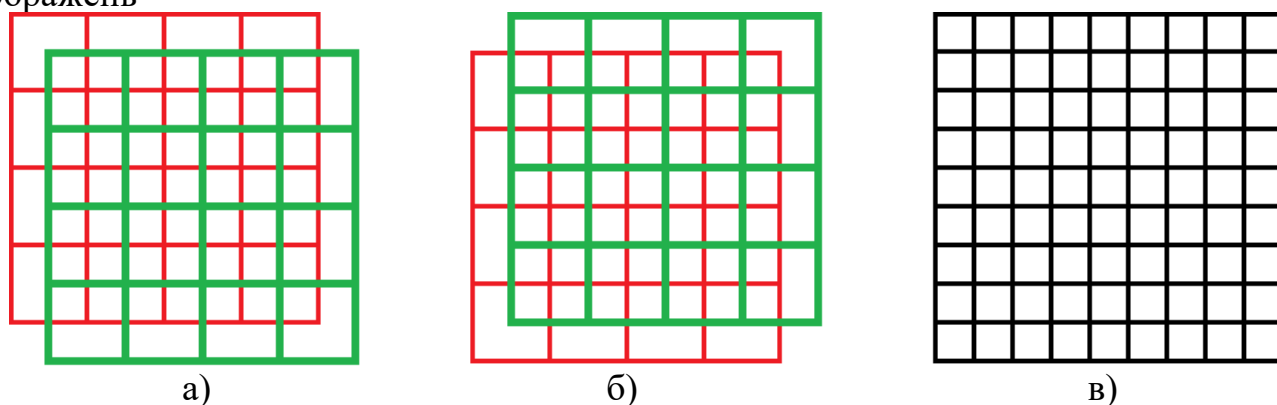


Рис. 3. Схеми отримання чотирьох низькороздільних зображень: а) перші пара зображень; б) друга пара зображень; в) зображення сформоване на основі а) і б)

Високороздільне зображення (тестове зображення), з якого формуються 4 низькороздільних зображення для моделювання, в матричній формі представляється як:

$$x_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccccc} x_{0,0} & x_{0,1} & x_{0,2} & \dots & x_{0,2n-1} \\ x_{1,0} & x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,2n-1} \\ x_{2,0} & x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{2m-1,0} & x_{2m-1,1} & x_{2m-1,2} & \dots & x_{2m-1,2n-1} \end{array} \right\} \quad (6)$$

При реальному скануванні ці 4 низькороздільні зображення будуть сформовані двома ПЗЗ-лінійками.

Матриці зображень, сформовані двома ПЗЗ лінійками, приймуть вигляд:

$$Y1_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccc} x_{0,0} + x_{0,1} + x_{1,0} + x_{1,1} & x_{0,2} + x_{0,3} + x_{1,2} + x_{1,3} & \dots & x_{0,n-2} + x_{0,n-1} + x_{1,n-2} + x_{1,n-1} \\ x_{2,0} + x_{2,1} + x_{3,0} + x_{3,1} & x_{2,2} + x_{2,3} + x_{3,2} + x_{3,3} & \dots & x_{2,n-2} + x_{2,n-1} + x_{3,n-2} + x_{3,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m-2,0} + x_{m-2,1} + x_{m-1,0} + x_{m-1,1} & x_{m-2,2} + x_{m-2,3} + x_{m-1,2} + x_{m-1,3} & \dots & x_{m-2,n-2} + x_{m-2,n-1} + x_{m-1,n-2} + x_{m-1,n-1} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$Y2_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccc} x_{1,0} + x_{1,1} + x_{2,0} + x_{2,1} & x_{1,2} + x_{1,3} + x_{2,2} + x_{2,3} & \dots & x_{1,n-2} + x_{1,n-1} + x_{2,n-2} + x_{2,n-1} \\ x_{3,0} + x_{3,1} + x_{4,0} + x_{4,1} & x_{3,2} + x_{3,3} + x_{4,2} + x_{4,3} & \dots & x_{3,n-2} + x_{3,n-1} + x_{4,n-2} + x_{4,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m-1,0} + x_{m-1,1} + x_{m,0} + x_{m,1} & x_{m-1,2} + x_{m-1,3} + x_{m,2} + x_{m,3} & \dots & x_{m-2,n-2} + x_{m-2,n-1} + x_{m-1,n-2} + x_{m-1,n-1} \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$Y3_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccc} x_{1,1} + x_{1,2} + x_{2,1} + x_{2,2} & x_{1,3} + x_{1,4} + x_{2,3} + x_{2,4} & \dots & x_{1,n-1} + x_{1,n} + x_{2,n-1} + x_{2,n} \\ x_{3,1} + x_{3,2} + x_{4,1} + x_{4,2} & x_{3,3} + x_{3,4} + x_{4,3} + x_{4,4} & \dots & x_{3,n-1} + x_{3,n} + x_{4,n-1} + x_{4,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m-1,1} + x_{m-1,2} + x_{m,1} + x_{m,2} & x_{m-1,3} + x_{m-1,4} + x_{m,3} + x_{m,4} & \dots & x_{m-1,n-1} + x_{m-1,n} + x_{m,n-1} + x_{m,n} \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$Y4_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccc} x_{0,1} + x_{0,2} + x_{1,1} + x_{1,2} & x_{0,3} + x_{0,4} + x_{1,3} + x_{1,4} & \dots & x_{0,n-1} + x_{0,n} + x_{1,n-1} + x_{1,n} \\ x_{2,1} + x_{2,2} + x_{3,1} + x_{3,2} & x_{2,3} + x_{2,4} + x_{3,3} + x_{3,4} & \dots & x_{2,n-1} + x_{2,n} + x_{3,n-1} + x_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m-2,1} + x_{m-2,2} + x_{m-1,1} + x_{m-1,2} & x_{m-2,3} + x_{m-2,4} + x_{m-1,3} + x_{m-1,4} & \dots & x_{m-2,n-2} + x_{m-2,n-1} + x_{m-1,n-2} + x_{m-1,n-1} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Зображення (7) та (8) сформовані першою ПЗЗ-лінійкою, (9) та (10) другою. В результаті суміщення елементів цих матриць одержимо матрицю  $y_{i,j}$  розміром  $2n \times 2m$  в інтервалах  $0 \dots 2n-1$  і  $0 \dots 2m-1$ :

$$y_{i,j} = \left\{ \begin{array}{cccccc} Y1_{0,0} & Y4_{0,0} & Y1_{0,1} & Y4_{0,1} & \dots & Y4_{0,n-1} \\ Y2_{0,0} & Y3_{0,0} & Y2_{0,1} & Y3_{0,1} & \dots & Y3_{0,n-1} \\ Y1_{1,0} & Y4_{1,0} & Y1_{1,1} & Y4_{1,1} & \dots & Y4_{1,n-1} \\ Y2_{1,0} & Y3_{1,0} & Y2_{1,1} & Y3_{1,1} & \dots & Y3_{1,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y2_{m-1,0} & Y3_{m-1,0} & Y2_{m-1,1} & Y3_{m-1,1} & \dots & Y3_{m-1,n-1} \end{array} \right\} \quad (11)$$

Таке формування, на відміну від відомих, 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. Після формування зображення, використовуючи регуляризацію Тихонова, виконується процедура усунення імпульсного відгуку системи та впливу апертури пікселя, які обмежують якість та роздільну здатність.

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  $n \times m$ , в другому випадку – використовуючи запропонований удосконалений алгоритм субпіксельної обробки.

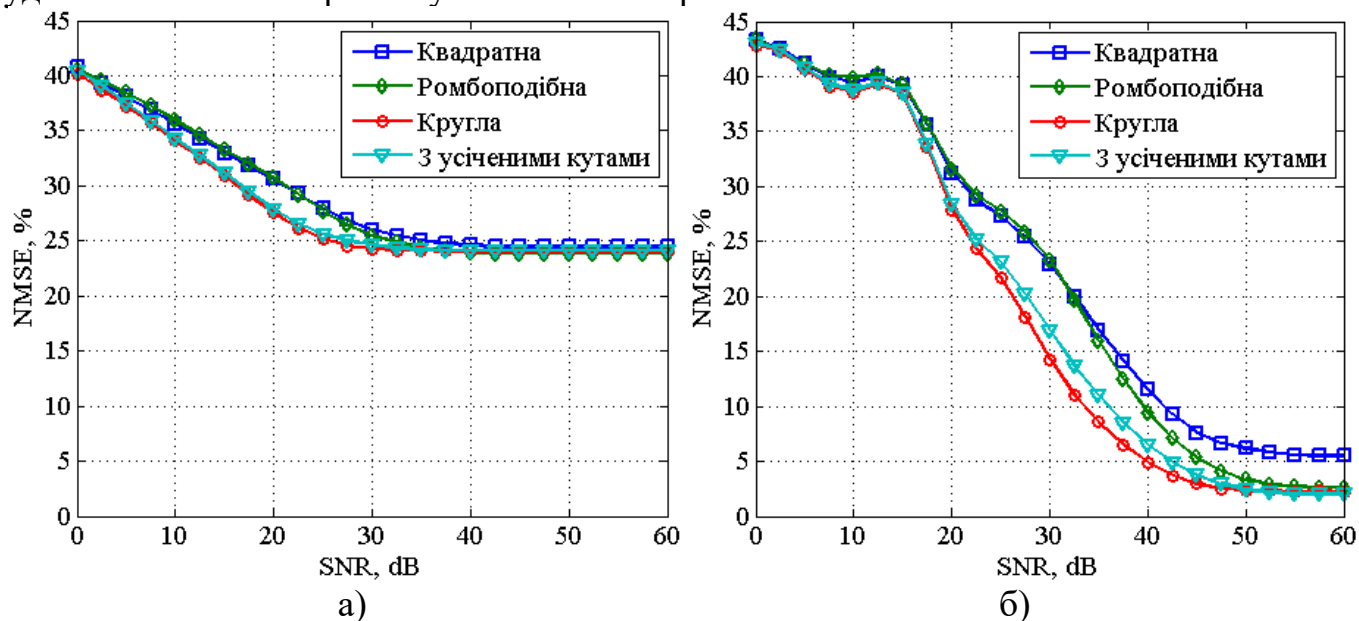


Рис. 4. Залежність нормованого середньоквадратичного відхилення значень інтенсивностей пікселів відновленого зображення розміром  $n \times m$  від ідеального для різних значень відношення сигнал/шум для різних форм апертури пікселів: а) без субпіксельної обробки зображень (зображення розміром  $n \times m$  інтерпольовано до розміру  $2n \times 2m$ ), б) при субпіксельній обробці зображень

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

Як видно з рис. 4 для апертури з круглою формою при значенні відношення сигнал/шум 43,2 дБ значення  $NMSE = 3,5\%$ , для апертури з усіченими кутами  $NMSE = 4,4\%$ , для квадратної  $NMSE = 8,6\%$ . Із приведених результатів видно, що найменший вплив на якість формування зображень надає апертура пікселя круглої форми. Пропонується використовувати апертуру пікселя з усіченими кутами, при якій нормована середньоквадратична похибка формування зображень є більшою ніж у круглої апертури пікселя лише на 0,9%.

У роботі промодельовано алгоритми підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень за рахунок панхроматичного зображення, оцінено якість формування зображень ними. Зроблено висновок, що найкраще застосовувати метод на основі перетворення Брові, та перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість (IHS).

У четвертому розділі – «Метод та алгоритм субпіксельної обробки зображень та засоби їх реалізації» – розроблено метод та алгоритм субпіксельної обробки

зображень; описано стадії визначення оптимального коефіцієнта регуляризації для відновлення зображень; проведено тестування запропонованого удосконаленого алгоритму субпіксельної обробки зображень; запропоновано рекомендації по технічній реалізації програмно-апаратних засобів для субпіксельної обробки зображень.

Удосконалений метод субпіксельної обробки зображень реалізується в два етапи. На першому етапі проводиться сканування та формування чотирьох зображень двома ПЗЗ лініями. Після цього значення пікселів комбінуються, згідно (3.6), в комбіноване зображення  $u$ . Наступним етапом методу є усунення впливу імпульсного відгуку системи субпіксельного формування зображення. Після цього проводиться усунення впливу апертури пікселя та параметрів руху КА (результуюча МПФ системи). Вплив апертури пікселя а також вплив результуючої МПФ системи 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. Внаслідок врахування результуючої МПФ модель сформованого зображення (5) прийме вигляд:

$$I(i, j) = S \cdot D \{ I(x, y) \oplus h(\xi, \eta, x, y) \cdot M_{\Sigma}(x, y) + N(x, y) \}, \quad (12)$$

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

Для оцінки завадостійкості запропонованого алгоритму субпіксельної обробки побудовано залежності нормованого середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від тестового, від BER.

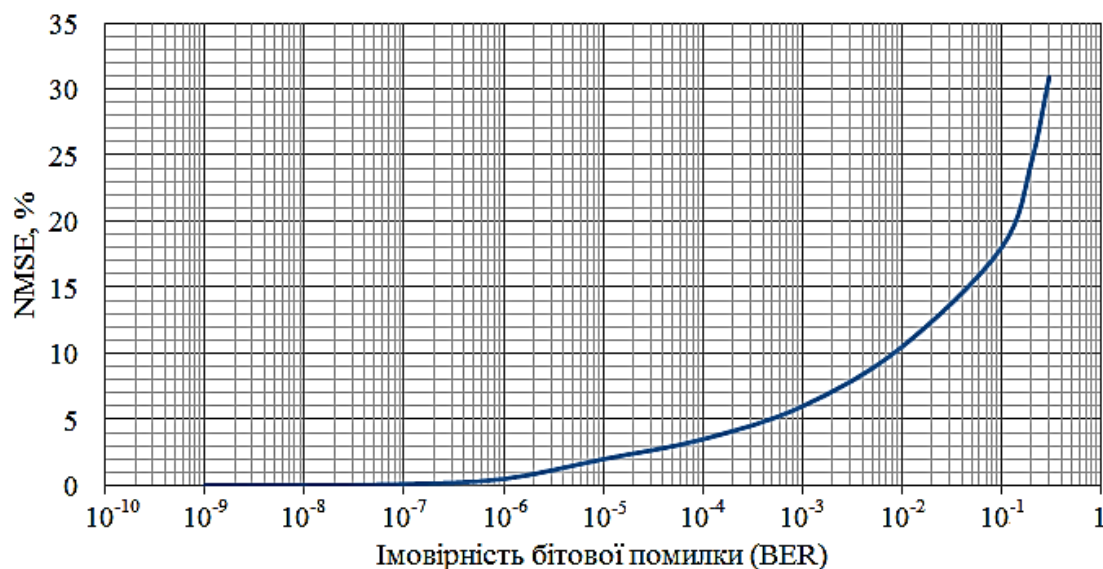


Рис. 5. Залежність нормованого середньоквадратичного відхилення сформованого зображення від значення імовірності бітової помилки

Проведено удосконалення методів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень IHS (інтенсивність-відтінок-насиченість) та Брові. Удосконалення даних методів полягає у додатковому підвищенні 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, наприклад, з 4 разів до 8.

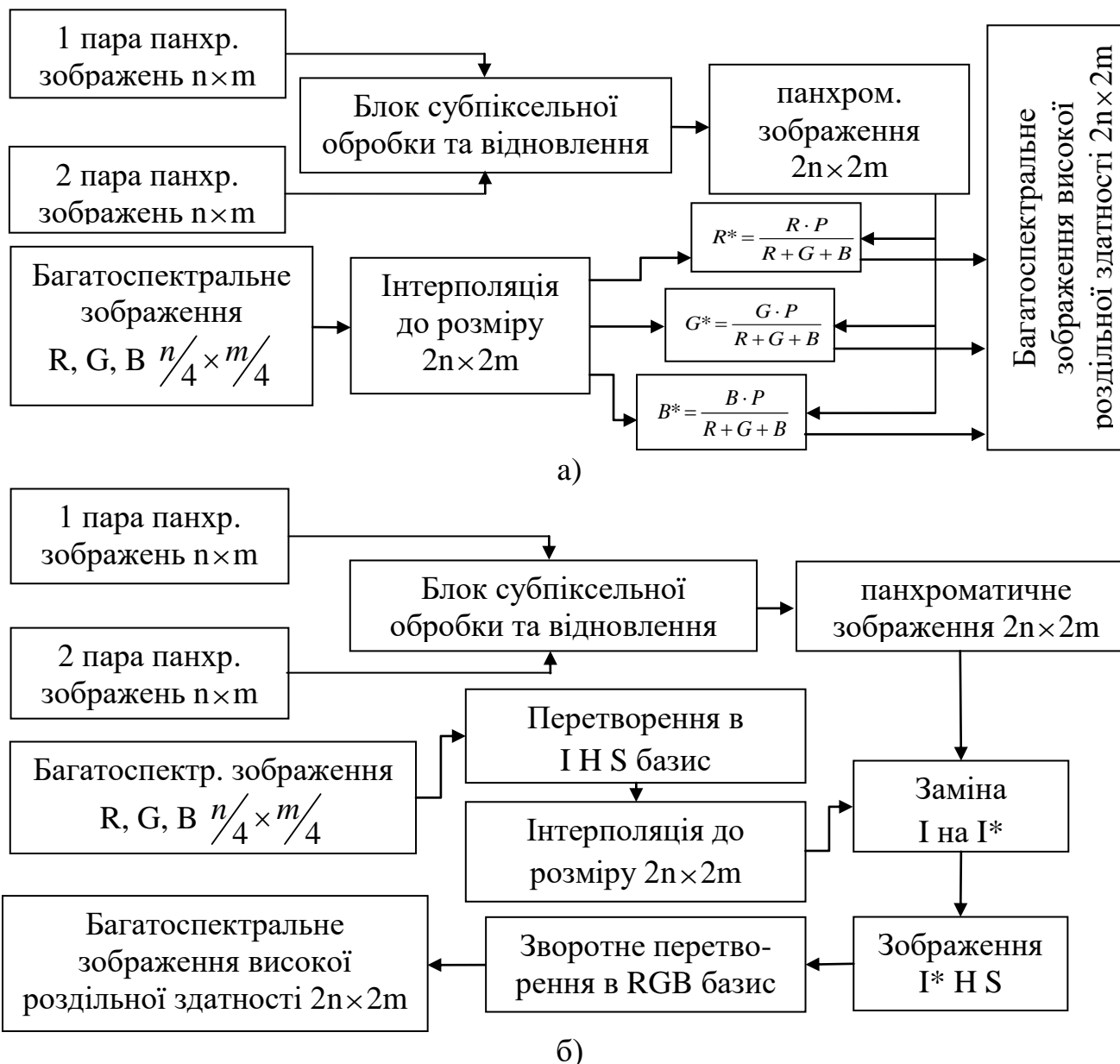


Рис. 6. Блок-схеми алгоритмів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням субпіксельної обробки: а) для методу Брові; б) для перетворення інтенсивність-відтінок-насиченість (IHS)

На рис. 7 наведено сформовані багатоспектральні зображення з підвищеною якістю, та розміром в 8 разів більшим ніж оригінальне кольорове зображення (КЗ). В табл. 1 наведено нормоване середньоквадратичне відхилення NMSE формування високороздільного зображення та коефіцієнт кореляції SSIM між тестовим та синтезованим багатоспектральним зображеннями.

Для підвищення роздільної здатності багатоспектрального зображення створено окремий програмний продукт. Для його 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 – оцінка якості зображень без еталонного зображення, для зображень спектральних каналів низькороздільного (вхідного) та високороздільного (сформованого) багатоспектральних зображень.



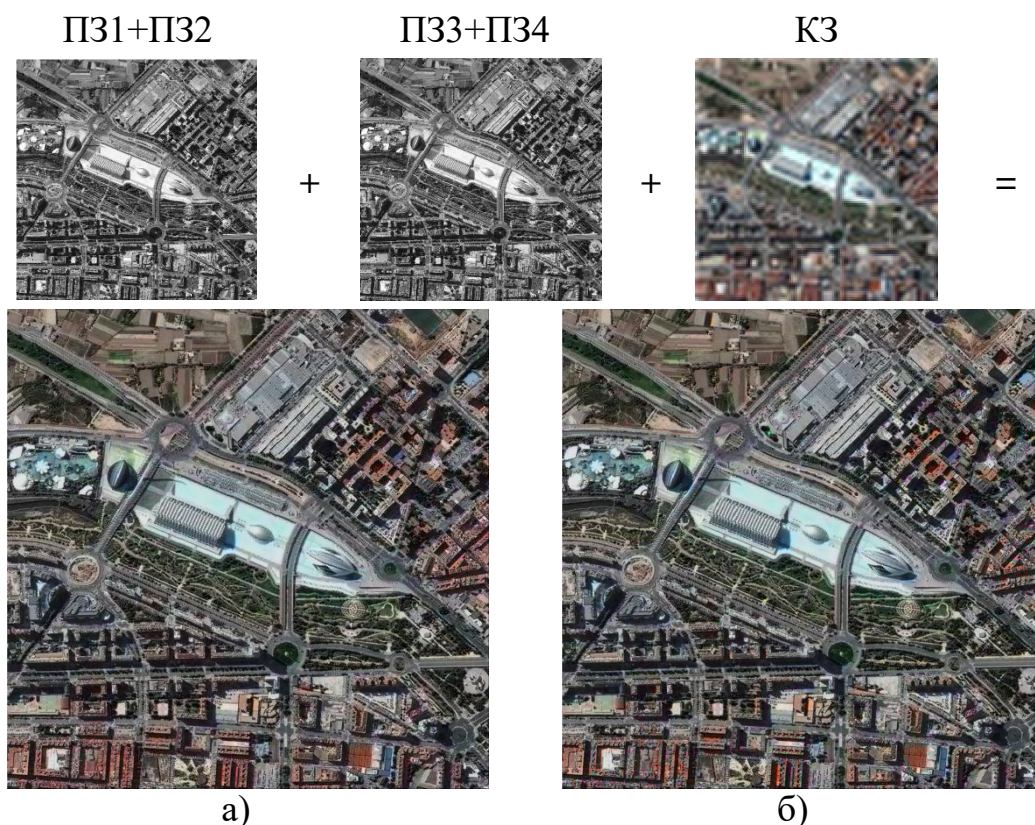


Рис. 7. Сформовані багатоспектральні зображення: а) методом Брові; б) методом IHS; ПЗ1-ПЗ4 – низькороздільні зображення панхроматичного каналу, КЗ – низькороздільне кольорове зображення

Таблиця 1

Результати моделювання при SNR = 40 Дб

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

В дисертації запропоновано спрощену структуру апаратури субпіксельної обробки зображень для КА та наземної станції.

Проведено порівняння результатів роботи запропонованого та відомого методів при імовірності бітової помилки  $2 \cdot 10^{-4}$ .

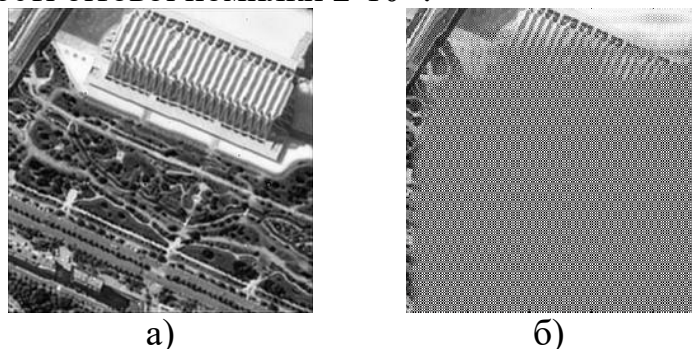


Рисунок 8 – Порівняння результатів роботи алгоритмів при BER= $2 \cdot 10^{-4}$ : а) – запропонований (NMSE = 3%); б) – відомий (NMSE = 94%)

Проведено порівняння часу виконання відомого алгоритму та запропонованого, результати подані в табл. 2.

Таблиця 2

### 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.)
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. 2) 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, за допомогою результуючої МПФ, практично рівний часу виконання 1 етапу. Навіть при окремому виконанні двох етапів відновлення вираш по часу виконання алгоритму становить в середньому 9%.

Зроблений висновок, що для заданих в дисертаційній роботі характеристик, проведення відновлення зображення в реальному масштабі часу космічними апаратами є неможливим, а для систем повітряного базування (БПЛА, тощо) є можливим до швидкості руху 216 км/год.

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

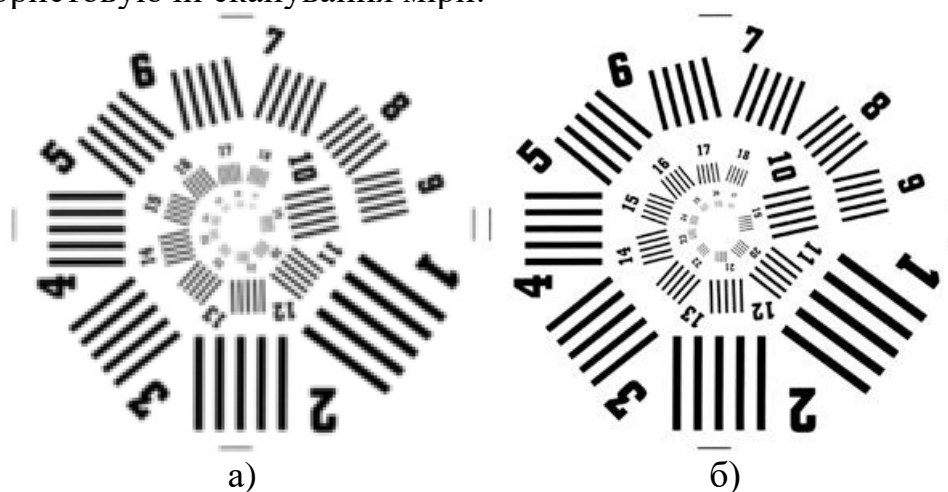


Рис. 9. Результати роботи запропонованого алгоритму: а) низькороздільне зображення (наприклад сформоване однією CCD8091); б) сформоване зображення за допомогою запропонованого удосконаленого методу

Моделювання проводилися на комп'ютері з процесором AMD A10-6800K з тактовою частотою 4,4 ГГц, та об'ємом доступної оперативної пам'яті – 7,19 Гб.

### 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.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.
2. 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 Hryvachevskiy // *Computational Problems of Electrical Engineering : науково-технічний журнал / Lviv Politechnic National University*; - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – Volume 5, number 1. – P. 41-46.
3. 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.
4. 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.
5. Фабіровський С.Є. Використання субпіксельної обробки зображень для підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень / С.Є.Фабіровський, І.Н. Прудіус // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2015. – № 818: Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 62–68.
6. Фабіровський С.Є. Субпіксельна обробка зображень як шлях підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень / С.Є. Фабіровський // *Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 20-й міжн. молодіж. форум, 19–21 квіт. 2016 р.: тези доп., том 3 – X.*, 2016. – С. 66-67.
7. Фабіровський С.Є. Формування зображень з підвищеною роздільною здатністю при субпіксельній обробці / С.Є. Фабіровський, А.П. Гривачевський // *Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: 19-й міжн. молодіж. форум, 20–22 квіт. 2015 р.: тези доп., том 3 – X.*, 2015. – С. 104-105.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Kondratov Peter. Subpixel processing of digital images obtained with CCD matrix/ Peter Kondratov, Albert Oganessian, Ivan Prudyus, Viktor Tkachenko, Sergiy Fabirovskyy // *Computation Problems of Electrical Engineering (CPEE-2015)*. – 2015. – P. 74–77.

12. 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 Konferencja "Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów" (Diag'2015). Ustroń. Polska. 22÷25 września 2015r. Referaty. S.79
13. 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. VII-9.
14. 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.
15. 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.
16. Прудюс И.Н. Повышение эффективности выявления объектов путем комплексирования данных радиомониторинга / И.Н. Прудюс, 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.
17. 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.

#### АНОТАЦІЯ

**Фабіровський С.Є. Підвищення роздільної здатності сенсорів видимого діапазону для систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення роздільної здатності сканерів видимого діапазону систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень. Для цього проведено оцінку методів підвищення роздільної здатності систем моніторингу видимого діапазону; оцінено вплив форми пікселів та ряду інших факторів на якість зображень; удосконалено матричну модель процесу субпіксельного формування зображень, яка, на відміну від відомих, враховує вплив апертури пікселя та параметри руху КА для сенсорів видимого діапазону систем моніторингу, що дозволяє покращити якість зображення та підвищити просторову роздільну здатність.

Удосконалено метод і алгоритм підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, розроблено практичні рекомендації щодо застосування структури сканера та алгоритмів обробки зображень.

Проведено експериментальну перевірку результатів субпиксельної обробки зображень на основі комп'ютерного моделювання.

Розроблено структурну схему процесорного модуля цифрової обробки сигналів, який реалізує запропонований удосконалений метод і алгоритм субпиксельної обробки зображень.

Розроблено програмні продукти для реалізації запропонованого алгоритму, методу субпиксельної обробки зображень та алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням програмного забезпечення Matlab.

**Ключові слова:** роздільна здатність, субпиксельна обробка, відновлення зображень, регуляризація, багатоспектральне зображення.

## АННОТАЦІЯ

**Фабировский С.Е. Повышение разрешения сенсоров видимого диапазона для систем мониторинга с субпиксельной обработкой изображений.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача – повышение разрешения сканеров видимого диапазона систем мониторинга с субпиксельной обработкой изображений. Для этого проведена оценка методов повышения разрешающей способности систем мониторинга видимого диапазона; оценено влияние формы пикселей и ряда других факторов на качество изображений; усовершенствована матричная модель процесса субпиксельного формирования изображений. Эта модель, в отличие от известных, учитывает влияние апертуры пикселя и других параметров, которые влияют на модуляционную передаточную функцию для сенсоров видимого диапазона систем мониторинга, это позволяет улучшить качество изображения и повысить пространственное разрешение.

Усовершенствовано метод и алгоритм повышения разрешения многоспектральных изображений за счет использования субпиксельной обработки изображения панхроматического канала, разработаны практические рекомендации по применению структуры сканера и алгоритмов обработки изображений.

Проведена экспериментальная проверка результатов субпиксельной обработки изображений на основе компьютерного моделирования, проведено сравнение времени работы и качества исходного изображения, предложенного метода и известного. Длительность обработки удалось сократить в среднем в 2,2 раза.

Разработана структурная схема процессорного модуля цифровой обработки сигналов, который реализует предложенный усовершенствованный метод и алгоритм субпиксельной обработки изображений.

Разработаны рекомендации по технической реализации процессорного модуля, что позволяет обеспечить математические операции по формированию изображений с субпиксельной обработкой, свертке изображений, восстановлению изображений видимого канала, устранению влияния апертуры пикселя, фильтрации

шумов, выбора оптимального значения коэффициента регуляризации при восстановлении изображений видимого диапазона волн.

Разработаны программные продукты для реализации предложенного алгоритма и метода субпиксельной обработки изображений, а также алгоритма повышения разрешения многоспектральных изображений с использованием программного обеспечения Matlab, что дает возможность автоматизировать процесс повышения разрешения изображений, полученных сканерами видимого диапазона.

**Ключевые слова:** разрешение, субпиксельная обработка, восстановление изображений, регуляризация, многоспектральные изображения.

#### ANNOTATION

**Fabirovskyy S.E. Improving the Resolution of the Visible Range Sensors for Monitoring Systems with Sub-pixel Image Processing.** – On the rights of manuscript.

Dissertation for the Ph.D. degree (candidate of sciences) on specialty 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

In the dissertation the actual scientific problem of resolution increasing of visible range scanners of monitoring systems with sub-pixel image processing is. For this, evaluation of the resolution increasing methods for visual range monitoring systems is conducted; evaluated impact of pixels shape and other factors on the image quality; improved the matrix model of sub-pixel imaging process, which, in contrast to the known, takes into account the pixel aperture effect for the visual range sensors of remote sensing systems. That increase the image quality and spatial resolution.

The method and algorithm of resolution increasing of multispectral images are improved. Practical recommendations of usage of the scanner structure and the image processing algorithms are developed.

Based on computer simulation experiment the verification of sub-pixel images processing results is conducted.

The block diagram of the digital processing module which implements the improved proposed algorithm of sub-pixel imaging is developed.

The software implementations of the algorithm, the method of sub-pixel image processing and the algorithm of the resolution increasing of multispectral images are developed with Matlab software.

**Keywords:** resolution, sub-pixel processing, image restoration, regularization, multispectral image.

Підписано до друку 03.10.2016 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний  
Друк на різнографі. Зам. №03/10-1  
Ум. друк. арк. 0,9  
Наклад 100 прим.

Друк ФОП Король І.В.  
м. Львів, вул. Гнатюка, 17  
Ел. пошта: lvivprint@ukr.net, Тел. 096-59-88-924  
Код ДРФО 2814706601  
Витяг з реєстру платників єдиного податку  
№1613073402716 від 26.02.2016