

## ВІДГУК

### офіційного опонента

на дисертаційну роботу Фабіровського Сергія Євгеновича, яка виконана за темою: «Підвищення роздільної здатності сенсорів видимого діапазону для систем моніторингу з субпіксельною обробкою зображень» і подана на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Актуальність теми дисертаційної роботи. Одним із важливих напрямів розвитку супутникових технологій, є системи дистанційного зондування Землі, що на сьогоднішній день стають основою цілої низки систем геодезичного, гідротехнічного, екологічного та інших видів моніторингу. Також, актуальність завдань, що вирішуються методами дистанційного зондування Землі визначається значним розширенням застосування дистанційних методів в наукових і прикладних дослідженнях навколишнього середовища, в сільському, лісовому господарстві та контролі надзвичайних ситуацій, що з огляду на кліматичні зміни і масштаби природних катаклізмів, в останній час, набувають зовсім іншого змісту.

Проте, таке специфічне застосування систем дистанційного зондування накладає на них цілу низку додаткових вимог, що з огляду на технічні можливості сучасної елементної бази і наявність великої кількості заважаючих факторів, не завжди можуть бути виконані лише за рахунок технологічного вдосконалення. Тому важлива роль в подальшому розвитку та вдосконаленні систем дистанційного зондування Землі на сьогоднішній день відводиться саме алгоритмічному і математичному аспектам їх функціонування.

Дана дисертаційна робота присвячена розвитку одного із найперспективніших методів підвищення роздільної здатності систем дистанційного зондування Землі оптичного діапазону – методу субпіксельної обробки та формування зображень, що за рахунок специфічних алгоритмів і нових математичних моделей дає змогу досягати значного покращення якості синтезованих зображень без необхідності ускладнення апаратури супутникового сегменту.

Метою дисертаційної роботи є розробка ефективних методів підвищення роздільної здатності в системах дистанційного зондування Землі видимого діапазону хвиль на основі субпіксельної обробки сигналів, що дають змогу досягти зменшення масогабаритних параметрів оптичної системи, а також розробка і удосконалення моделей та алгоритмів субпіксельної обробки

зображень для підвищення якості та роздільної здатності як панхроматичного так і багатоспектрального каналів.

Розроблена в дисертації удосконалена математична модель процесу формування та відновлення зображень сканером видимого діапазону хвиль з субпіксельною обробкою, що враховує різні фактори впливу в поєднанні з лінійно-фільтровою моделлю процесу формування зображень дає змогу підвищити роздільну здатність сканерів видимого діапазону систем дистанційного зондування Землі, які встановлюються на космічних апаратах, що є актуальним на сьогоднішній день науковим завданням.

Зв'язок дисертаційних досліджень з плановими НДР. Результати дисертаційної роботи пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, що виконувалися кафедрою «Радіоелектронних пристроїв та систем», а саме: «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер»; № 0113U001355; «Розроблення засобів і методів формування та обробки багатоспектральних зображень для систем спеціального призначення» № 0115U000435. В перерахованих науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

#### Аналіз змісту дисертаційної роботи

У вступі відповідно до вимог, обґрунтована актуальність обраної теми дослідження, сформульовані мета, об'єкт і предмет дослідження, визначена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію та характеристику публікацій.

В першому розділі роботи проведено аналіз основних підходів побудови систем дистанційного зондування Землі оптичного діапазону. Розглянуто існуючі методи підвищення роздільної здатності зображень в даних системах та основні принципи субпіксельної обробки зображень.

Сформульовано критерії для вибору фотоприймачів з часовою затримкою та накопиченням для сканерів високої роздільної здатності.

У другому розділі, розглянуто фактори, що впливають на роздільну здатність сканерів з високою роздільною здатністю, досліджено вплив параметрів стабілізації космічного апарату на максимальну кількість стадій накопичення CCD8091, досліджено вплив зміни висоти орбіти КА на вибір оптимальних значень часу експозиції і частоти сканування рядків CCD8091 та вплив апертури пікселя. Досліджено вплив відхилення номінальної висоти польоту космічного апарату над земною поверхнею на обмеження



максимально-можливої кількості стадій накопичення у ЧЗН-фотоприймачі CCD8091.

У третьому розділі дисертації розроблено удосконалену модель субпіксельної обробки зображень, застосування якої, дає змогу зменшити навантаження на бортовий процесор космічного апарату і при цьому досягти підвищення просторової роздільної здатності. Проведено оцінку впливу форми апертури пікселя, що діє як просторовий фільтр низьких частот та запропоновано метод усунення вказаного впливу за допомогою субпіксельного формування зображень та поєднання його з фільтрацією і використанням регуляризації Тихонова.

Проведено моделювання алгоритму підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, в результаті якого зроблено оцінку якості їх формування.

У четвертому розділі дисертаційного дослідження розроблено алгоритм субпіксельної обробки зображень для стадії формування на космічному апараті та алгоритм субпіксельної обробки зображень на наземній станції. Розроблено та досліджено 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. Розроблено рекомендації технічної реалізації процесорного модуля для субпіксельної обробки сигналів.

Наукова новизна результатів дисертаційних досліджень. На підставі поглибленого аналізу змісту дисертаційної роботи можна зробити висновок про наявність наукової новизни отриманих результатів, що 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 космічного апарату, 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 із урахуванням положення космічного апарату на різних широтах земної поверхні, що покращує параметри, зокрема завадостійкість системи дистанційного зондування Землі.

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 дає змогу підвищити 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 результатів дисертаційної роботи. Результати проведеного дисертаційного дослідження дали змогу встановити максимальне значення кількості стадій накопичення ПЗЗ лінійки з часовою затримкою та накопиченням, урахування якого в процесі обробки сигналів, дає змогу одночасно зменшити масо-габаритні характеристики сканера і підвищити його чутливість без спотворення сформованого зображення. Також в роботі проведений детальний аналіз ефективності геометричної форми пікселя за різними критеріями, результати якого дадуть можливість розробникам відповідної апаратури обґрунтовано робити вибір ПЗЗ матриць з оптимальними формами пікселя залежно від задачі. Для систем дистанційного зондування вибір було зроблено на користь форми, що наближена до круглої та дає вигоду, в якості відновлення, порівняно з квадратною формою на 4-7%. Удосконалено метод та алгоритм підвищення роздільної здатності панхроматичних та багатоспектральних зображень шляхом використання підходів субпіксельної обробки зображень з урахуванням апертури пікселя, що дає змогу підвищити роздільну здатність до 2 разів, навіть в присутності шумів.

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

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», що підтверджено відповідними актами впровадження.



Достовірність та обґрунтованість наукових результатів визначається коректним використанням математичних методів побудови математичних моделей і теоретичних розробок попередніх дослідників у даній галузі, перевіркою адекватності запропонованих моделей шляхом визначення співпадінь результату в частковому випадку з відомим результатом. Всі моделі побудовані на апробованій в теорії радіотехнічних кіл та сигналів аксіоматиці.

Робота за змістом відповідає спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. Автореферат відображає зміст дисертаційної роботи.

Наукові та практичні результати роботи достатньо повно викладені у публікаціях автора та апробовані на конференціях.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Огляд існуючих наукових результатів в обраній області дослідження переважно присвячений аналізу різних оптичних ефектів і елементної бази в галузі фототехніки, хоча доцільніше було б висвітити існуючі досягнення в галузі обробки сигналів, зокрема, в розвитку методів субпіксельної обробки зображень в оптико-електронних системах.

2. При дослідженні впливу форми пікселя ПЗЗ матриці на якість відновлення зображення (вираз 2.29 (стор. 80), рис. 2.5 (стор. 80)) висновки зроблені по залежності якості зображення від відношення сигнал/шум, хоча ні модель шуму ні варіант взаємодії шуму і сигналу не обумовлено. Крім того, висновки зроблені в результаті дослідження контрастно-частотних характеристик, є необґрунтованими, оскільки жодної залежності на основі яких вони зроблені не приведено.

3. Функція розсіяння точки, що приведена на рис. 3.7 (стор. 92) для випадку субпіксельної обробки приведена без належного обґрунтування а її вигляд суперечить висновкам зробленим у першому розділі (п.п. 1.2.1. стор. 28).

4. В дисертаційній роботі формально представлено перелік умовних скорочень, оскільки він містить лише незначну частину скорочень, які зустрічаються по тексту, а частина приведених у списку скорочень не зустрічаються взагалі (як приклад ЛБ, ПЗП, тощо).

5. Зазначені автором методи досліджень, які він застосував для отримання наукових результатів не відповідають змісту отриманих результатів, що також свідчить про певну формальність при написанні окремих частин роботи.

6. Не зрозуміло для чого в п.п. 3.3 приведено загальний аналіз різних відомих методів фільтрації, що містить загальновідому інформацію.



7. Викликає певний сумнів адекватність приведеної на рис. 4.7 залежності, яка демонструє наявність певного порогового ефекту, що відсутній на попередніх графіках як для методу субпіксельної обробки так і для обраного методу модуляції.

Вищезазначені зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи.

Загальний висновок по роботі. Вважаю, що дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, направленим на вирішення актуального наукового завдання, що полягає в підвищенні роздільної здатності сканерів видимого діапазону систем дистанційного зондування Землі, які встановлюються на космічних апаратах шляхом розробки удосконаленої математичної моделі процесу формування зображень сканером видимого діапазону хвиль із застосуванням субпіксельної обробки, що враховує різні фактори впливу, а також використання лінійно-фільтрової моделі процесу формування зображень у вигляді рівняння Фредгольма першого роду, з ядром типу згортки в спектральній області. За актуальністю обраної теми досліджень, науковою новизною і практичною значимістю результатів, робота задовольняє існуючим вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор Фабіровський Сергій Євгенович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

**Офіційний опонент:**

кандидат технічних наук, доцент,  
начальник (завідувач) кафедри зв'язку, автоматизації  
та захисту інформації Національної академії Державної прикордонної служби  
України імені Богдана Хмельницького

І. І. Чесановський

Підпис доцента Чесановського І. І. засвідчую.

Начальник відділення контролю та  
документального забезпечення

О. М. Олошинець

« 28 »

(М.П.)

